



*Escuela Técnica Superior de
Ingenieros de Caminos, Canales
y Puertos.*

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



APLICACIÓN DE TÉCNICAS ESTADÍSTICAS A IMÁGENES DIGITALES PARA LA OBTENCIÓN DE LA BATIMETRÍA Y SU EVOLUCIÓN EN LA PLAYA DE LA MAGDALENA

Trabajo realizado por:

Aritz Abalia Patiño

Dirigido:

Ernesto Mauricio González Rodríguez

Omar Quetzalcóatl Gutiérrez

Titulación:

**Máster Universitario en
Costas y Puertos**

Santander, septiembre de 2020

TRABAJO FINAL DE MASTER

RESUMEN

Título: Aplicación de técnicas estadísticas a imágenes digitales para la obtención de la batimetría y su evolución en la Playa de la Magdalena.

Autor: Aritz Abalia Patiño.

Directores: Ernesto Mauricio González Rodríguez y Omar Quetzalcóatl Gutiérrez

Fecha de presentación: Septiembre de 2020.

La Playa de la Magdalena, ubicada en la Bahía de Santander (Cantabria, España), es una playa con un gran atractivo turístico, debido a su propia localización cercana al núcleo urbano, y sus características de oleaje débil ya que se encuentra protegida en el interior de la bahía. En enero de 2018 se comenzó el proyecto de la estabilización del sistema de playas Magdalena-Peligros, cuyo objetivo era cesar la erosión producida en la Playa de la Magdalena mediante la construcción de dos diques. El IHCantabria decidió implantar un sistema de cámaras para llevar a cabo la monitorización de la playa durante el periodo de estabilización de la misma. Las obras se detuvieron debido a diversas manifestaciones en contra de las mismas, esto fue posterior a la construcción del primer dique en frente al Restaurante Balneario de la Magdalena.

En el presente estudio se ha desarrollado una metodología de obtención de la batimetría de una playa mediante videometría costera, aplicando técnicas estadísticas a imágenes. Se dispone de la playa videomonitorizada en el periodo durante el cual se llevaron a cabo las obras y en el periodo posterior a las mismas. La implementación y validación de la metodología, mediante la cual se ha obtenido la batimetría de la Playa de la Magdalena, se ha llevado a cabo el 29 de septiembre de 2019, cuyos resultados se han validado mediante una batimetría medida en una salida de campo el mismo día. Posteriormente, se ha implementado la metodología en distintas fechas para así poder llevar a cabo el análisis de la evolución morfológica de la Playa de la Magdalena a largo plazo, mediante la información obtenida de la estación de videomonitorización sobre la evolución de la línea de costa, la variación del volumen entre batimetrías y las tasas de transporte.

La obtención de la batimetría en la playa se ha dividido en dos partes, por un lado, la obtención de la batimetría intermareal utilizando herramientas de detección de líneas de costa basadas en las Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs), mediante la cual se han obtenido unos resultados muy buenos, como por ejemplo, un error cuadrático medio de alrededor de 10 centímetros respecto a la batimetría medida. Por otro lado, la obtención de la batimetría submareal (batimetría sumergida bajo el agua), se ha llevado a cabo mediante el desarrollo de un modelo batimétrico, basado en las Funciones Empíricas Ortogonales. En esta nueva línea de investigación se han obtenido avances muy buenos, pudiendo estimar batimetrías hasta profundidades de alrededor de un metro respecto al nivel del mar, con un error cuadrático medio asociado de alrededor de 15 centímetros.

Finalmente, se ha podido caracterizar correctamente la evolución morfológica de la Playa de la Magdalena mediante imágenes, ya que se analizan procesos en 3D, concluyendo que la Playa de la Magdalena se encuentra en erosión debido a las obras inconclusas, las cuales protegen la zona frente al Restaurante Balneario de la Magdalena, pero no solucionan el problema de erosión de la playa a largo plazo.

Palabras clave: Videometría, batimetría, EOFs, modelo batimétrico, evolución morfológica.

ABSTRACT

Title: Application of statistical techniques to digital images for obtaining bathymetry and its evolution in Playa de la Magdalena.

Author: Aritz Abalia Patiño.

Directors: Ernesto Mauricio González Rodríguez and Omar Quetzalcóatl Gutiérrez.

Date of presentation: September 2020.

Playa de la Magdalena, located in Santander Bay (Cantabria, Spain), is a beach with a great tourist attraction, due to its own location near the town, and its characteristics of weak waves as it is protected inside the bay. In January 2018, the project “Estabilización del sistema de playas Magdalena-Peligros” was started. The objective of this project was to stop the erosion produced in Playa de la Magdalena by means of the construction of two dikes. IHCantabria decided to implement a camera system to monitor the beach during the stabilization period. The work was stopped due to several demonstrations against it after the construction of the first dyke in front of the Balneario de la Magdalena Restaurant.

In the present study, a methodology has been developed to obtain the bathymetry of a beach by means of coastal videometry, applying statistical techniques to images. The beach was video monitored during the period of the works and in the period after them. The implementation and validation of the methodology, whereby the bathymetry of the Magdalena Beach has been obtained, has been carried out on September 29th, 2019, whose results have been validated according to a bathymetry measured in a field trip the same day. Subsequently, the methodology has been implemented on different dates in order to carry out the analysis of the morphological evolution of the Magdalena Beach in the long term, according to the information obtained from the video-monitoring station on the evolution of the coastline, the volume variation between bathymetries and the transport rates.

The obtaining of the bathymetry on the beach has been divided in two parts, on the one hand, the obtaining of the intertidal bathymetry using tools for the detection of coastlines based on the Empirical Orthogonal Functions (EOFs), through which very good results have been obtained, such as a mean square error of about 10 centimeters with respect to the measured bathymetry. On the other hand, obtaining subtidal bathymetry (submerged bathymetry under water), through the development of a bathymetric model, based on the Empirical Orthogonal Functions. In this new line of research very good advances have been obtained, being able to estimate bathymetries up to depths of about one meter with respect to the sea level, with an associated mean square error of about 15 centimeters.

Finally, it has been possible to correctly characterize the morphological evolution of Playa de la Magdalena by means of images, since processes are analyzed in 3D, concluding that the beach is under erosion due to unfinished works, which protect the area in front of the Balneario de la Magdalena Restaurant, but do not solve the problem of beach erosion in the long term.

Keywords: Videometry, bathymetry, EOFs, bathymetric model, morphological evolution.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. MOTIVACIÓN	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ORGANIZACIÓN DEL ESTUDIO	3
2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO, DATOS Y SISTEMA DE CÁMARAS	4
2.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA PLAYA	4
2.2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA	6
2.3. SISTEMA DE CÁMARAS	10
2.4. BATIMETRÍA	12
2.5. DINÁMICAS MARINAS	13
2.5.1. OLEAJE	14
2.5.2. NIVEL DEL MAR	14
3. METODOLOGÍA	16
3.1. INTRODUCCIÓN	16
3.2. METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN DE LA BATIMETRÍA	16
3.2.1. INTRODUCCIÓN	16
3.2.2. BATIMETRÍA INTERMAREAL	17
3.2.3. BATIMETRÍA SUBMAREAL	18
3.2.4. RECONSTRUCCIÓN DE LA BATIMETRÍA	27
3.3. VALIDACIÓN DE LA BATIMETRÍA	28
3.4. ESTUDIO DE EVOLUCIÓN DE LA PLAYA DE LA MAGDALENA	28
3.4.1. LARGO PLAZO	28
4. IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO BATIMÉTRICO EN LA PLAYA DE LA MAGDALENA	30
4.1. IMPLEMENTACIÓN	30
4.1.1. BATIMETRÍA INTERMAREAL	30
4.1.2. BATIMETRÍA SUBMAREAL	33
4.1.3. RECONSTRUCCIÓN BATIMÉTRICA	50
4.2. VALIDACIÓN DE LA BATIMETRÍA	53
4.3. DISCUSIÓN	57
5. ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN Y ESTABILIDAD MORFOLÓGICA DE LA PLAYA DE LA MAGDALENA	60
5.1. INTRODUCCIÓN	60
5.2. ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN A LARGO PLAZO DE LA BATIMETRÍA	60
5.2.1. DETERMINACIÓN DE LAS BATIMETRÍAS	61

5.2.2. RECONSTRUCCIÓN DE LAS BATIMETRÍAS	73
5.2.3. MORFODINÁMICA DE LA PLAYA DE LA MAGDALENA	73
5.2.4. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA.....	75
5.2.5. VARIACIÓN DEL VOLUMEN	77
5.2.6. TASAS DE TRANSPORTE.....	83
5.2.7. CONCLUSIONES Y EVOLUCIÓN FUTURA DE LA PLAYA	84
6. CONCLUSIONES GENERALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	86
6.1. CONCLUSIONES GENERALES DEL ESTUDIO	86
6.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	86
BIBLIOGRAFÍA.....	88
ANEXOS	89
A.I. FUNCIONES EMPÍRICAS ORTOGONALES (EOFs).....	89
A.I.1 INTRODUCCIÓN.....	89
A.I.2 DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA	89
A.I.3 TEORÍA DE LA DESCOMPOSICIÓN DE VALORES SINGULARES.....	91
A.I.4 APLICACIÓN A IMÁGENES DIGITALES DE PLAYAS	92
A.II. ESTIMACIONES DE LA BATIMETRÍA DEL 29 DE SEPTIEMBRE DE 2019.....	94
A.III. COHERENCIA DE LOS RESULTADOS DEL MODELO BATIMÉTRICO DEL 29 DE SEPTIEMBRE DE 2019	99
A.IV. VALIDACIÓN DEL MODELO BATIMÉTRICO DEL 29 DE SEPTIEMBRE DE 2019	101
A.V. DETERMINACIÓN DE LAS BATIMETRÍAS PARA EL ANÁLISIS A LARGO PLAZO.....	104
A.VI. RECONSTRUCCIÓN DE LAS BATIMETRÍAS PARA EL ANÁLISIS A LARGO PLAZO	109
A.VII. IMÁGENES TIMEX DE COMPARACIÓN DE BATIMETRÍAS.....	112

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

Las playas representan valores recreativos, ecológicos y económicos, además de actuar como protecciones costeras frente al oleaje.

La Península Ibérica dispone de 7905 kilómetros de costa, donde habita la mayor parte de la población, y por lo tanto donde se desarrolla un gran porcentaje de las actividades económicas, destacando el turismo, que en el año 2018 aportó el 12% del PIB y el 13% del empleo. El punto de inflexión para el despegue de la contribución del turismo se produjo en 2013, cuando la aportación a la riqueza nacional bajó a 109820 millones y un porcentaje del 10.7% del PIB. Entre los años 2013 y 2018, el crecimiento de la contribución del turismo ha sido de 7.636 millones al año (Instituto Nacional de Estadística, 2019).

La costa española representa una gran parte de la economía del país, gracias al turismo, la industria energética relacionada con el gas y el petróleo y el comercio marítimo entre otros factores.

La comunidad autónoma de Cantabria, donde se centra el presente estudio, el turismo representa el 10.9% del PIB regional y el 11.4% de empleo de la comunidad (Instituto Nacional de Estadística, 2019). Las playas de la región representan un importante valor a conservar y mantener.

En particular, en la Bahía de Santander se localiza la Playa de la Magdalena, la cual representa un gran atractivo turístico. Aunque es una playa pequeña, gracias a sus condiciones de poca energía del oleaje, su orientación y su localización en la zona urbana, es una playa de gran valor para la ciudad.

Esta playa, tal y como explica Asla Torralbo, 2015, se encuentra en desequilibrio. Por esta razón, a lo largo del tiempo ha sido regenerada mediante dragados de arena de la Bahía de Santander, debido a su pérdida constante de arena. Sin embargo, a pesar de llevar a cabo dicho mantenimiento de la playa, esta evoluciona a una situación sin arena en los periodos de invierno. Por esta razón, se planteó la estabilización de la playa, ya que al ser un gran atractivo turístico la conservación de la playa es fundamental.

El Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cantabria (IHCantabria) llevó a cabo un estudio en el que planteó distintas alternativas frente al problema de pérdida de arena. Posteriormente, se planteó un proyecto basado en una de las alternativas propuestas en dicho estudio, el cual consistía en obras para la estabilización de la playa. Este proyecto fue seleccionado por la ciudadanía mediante concurso público. La obra seleccionada se basa en la construcción de un primer dique en la zona del Balneario de la Magdalena, un espigón que seguirá la alineación del Muelle del Promontorio de San Martín, y otro espigón perpendicular a la dirección del flujo medio de energía. Finalmente, este proyecto fue aprobado y se comenzaron las obras del primer dique, finalizando su construcción en mayo del año 2018.

El 24 de mayo de 2018 se detuvo la obra debido al comienzo del periodo estival, y la intención era retomarla el 29 de septiembre de 2018, al fin del periodo estival. Debido a manifestaciones llevadas a cabo por el impacto paisajístico del primer dique construido, y al cambio del partido político en el poder, la obra no se retomó. Por lo tanto, desde ese entonces, la playa evoluciona

de forma natural, ante las obras inconclusas que no necesariamente cumplen con su objetivo de estabilización.

Conociendo la importancia de las playas, generalmente, no hay suficiente información sobre ellas, por ejemplo, los datos de batimetrías de una playa tienen un desfase temporal entre ellas que impide ver las variaciones de la misma, y, por lo tanto, no permite un estudio detallado.

Dada la importancia de la Playa de la Magdalena en la región y la oportunidad que se presentaba, el Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cantabria (IHCantabria) instaló una estación de monitorización para llevar a cabo el seguimiento de los cambios en la playa durante la construcción de la obra y el tiempo posterior.

La estación de monitorización cuenta con 3 cámaras de vídeo orientadas a las playas de la Magdalena, Peligros y Bikinis. Estas capturan imágenes digitales continuamente, las cuales son capaces de capturar los fenómenos de distintas escalas espaciales y temporales. Son de gran utilidad a la hora de generar información en distintas escalas espaciales (desde centímetros hasta varios kilómetros) y temporales (desde segundos hasta años) con una precisión razonable.

En la actualidad existen algunas técnicas y metodologías diseñadas para obtener información a partir de las imágenes, por ejemplo, posición de línea de costa, batimetría intermareal... (Osorio Arias, 2005, Bergsma *et al.*, 2016, Osorio, Medina and Gonzalez, 2012). Sin embargo, muchas de estas técnicas requieren de un esfuerzo humano importante, además de supervisión de las mismas.

Recientemente, en el estudio de Echenique Santisteban, 2016, se exploró la posibilidad de aplicar Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs) para obtener la línea de costa de las imágenes de la playa. A partir de esto, se desarrolló en el IHCantabria una herramienta para determinar automáticamente la línea de costa a partir de las imágenes y se empezó a trabajar en una metodología para extraer información batimétrica de las imágenes utilizando los EOFs.

En este estudio se plantea analizar la evolución morfológica de la Playa de la Magdalena en el periodo de las obras llevadas a cabo con ayuda de las imágenes obtenidas mediante dicha instalación de videometría, para lo cual se implementará y validará la metodología de obtención de la información topo-batimétrica a partir de imágenes.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente estudio se basa en implementar y validar la metodología de obtención de información topo-batimétrica de la Playa de la Magdalena durante el periodo 2018-2019 a partir de imágenes.

Los objetivos específicos son:

- Implementar la herramienta desarrollada por el IHCantabria en la Playa de la Magdalena para obtener la batimetría intermareal y validarla posteriormente con una batimetría medida.
- Implementar la metodología para obtener la batimetría submareal mediante el desarrollo de un modelo batimétrico en la Playa de la Magdalena y validarla con una batimetría medida.

- Estudiar la evolución y estabilidad morfológica de la Playa de la Magdalena producto de las obras realizadas a largo plazo, en un contexto estacional, aplicando tasas de transporte, variación de línea de costa y variación del volumen desde las imágenes.

1.3. ORGANIZACIÓN DEL ESTUDIO

Con el fin de facilitar la comprensión del presente estudio, se han redactado distintos capítulos y anexos, donde se describe la zona de estudio, los datos disponibles y el sistema de cámaras, la metodología para la detección de líneas de costa y batimetrías, la implementación y validación de las metodologías en la Playa de la Magdalena, el estudio de la evolución y estabilidad morfológica de la Playa de la Magdalena, y finalmente las conclusiones y futuras líneas de investigación. La organización del estudio es la siguiente:

- **Descripción de la zona de estudio, datos y sistema de cámaras.** Se ubica y describe la zona de estudio, el contexto histórico de la zona de estudio, los datos de la dinámica marina y el sistema de cámaras.
- **Metodología.** Se explica la metodología empleada para la obtención tanto de la batimetría intermareal como la batimetría submareal.
- **Implementación y validación del modelo batimétrico en la Playa de la Magdalena.** Se muestran los resultados obtenidos de la implementación del modelo batimétrico en la Playa de la Magdalena obteniendo la batimetría intermareal y la batimetría submareal con sus correspondientes validaciones y discusión.
- **Estudio de la evolución y estabilidad morfológica de la Playa de la Magdalena.** Se obtiene la batimetría de la Playa de la Magdalena en distintas fechas y se describe la evolución morfológica mediante la evolución de la línea de costa, la variación del volumen y las tasas de transporte obtenidas a través de imágenes, todo esto en un contexto estacional.
- **Conclusiones generales y futuras líneas de investigación.** Se explican las conclusiones generales obtenidas en el estudio, y se proponen futuras líneas de investigación en base al presente estudio.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO, DATOS Y SISTEMA DE CÁMARAS

En el presente apartado se lleva a cabo una breve descripción de la localización y morfología de la zona de estudio, se describe la evolución histórica de la Playa de la Magdalena tanto con sus problemas como con las actuaciones llevadas a cabo en la misma, posteriormente se muestran las características tanto de la estación de monitoreo como de sus cámaras, para continuar con la representación de la batimetría medida de la cual se dispone, y finalmente, se describe brevemente la dinámica marina del oleaje y nivel del mar en la zona de estudio.

2.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA PLAYA

Nos encontramos en Santander, la capital de Cantabria (España), más específicamente en la Playa de la Magdalena, ubicada dentro de la Bahía de Santander (figura 1).

Comenzando con una descripción del área de estudio, desde el extremo norte, el cual parte en el Cabo Mayor, le sigue el Cabo Menor donde se encuentran apoyadas las Playas del Sardinero. Continuando hacia el sur, se encuentra la Playa el Camello que delimita en su parte este con la Península de la Magdalena. Al sur de la misma se encuentran las Playas de la Magdalena y Bikinis, siendo la primera nuestra área de estudio. Al otro lado de la Bahía de Santander, yendo de este a oeste, se encuentran las Playas Loredó, Somo y el Puntal. Otros elementos relevantes son la Isla de Mouro y la Isla de Santa Marina. Véase figura 2.

Yendo a una escala más local, la Playa de la Magdalena delimita en su parte este con la Playa de los Bikinis, estando ambas playas separadas por un espigón (el cual se construyó en el año 2018, como se describirá en el apartado 2.2). Dentro de la misma, los elementos más representativos de la Playa de la Magdalena son, de este a oeste, el espigón previamente mencionado, la ubicación de la estación de monitoreo, el Restaurante Balneario de la Magdalena, la Punta de San Marcos, y finalmente, la playa termina en el Muelle del Promontorio de San Martín (figura 3). Esta playa queda capturada mediante la cámara 1 (cuadrado azul), y la cámara 2 (cuadrado rojo).

La Playa de la Magdalena dispone de una longitud de 900m, está localizada en el interior de la Bahía de Santander y tiene una orientación de N45°E, por lo que se encuentra protegida de los oleajes más fuertes procedentes del NNW, y, por lo tanto, el oleaje que recibe es un oleaje débil filtrado en la Bahía de Santander. Por otro lado, recibe los oleajes generados en la propia bahía, es decir, oleajes provenientes del sur, debido al gran fetch del cual dispone, que permite la generación del oleaje.

Las características de la playa están influenciadas por el nivel del mar, ya que este es variable, y se dispone de dos pleamares y dos bajamares diarias, lo que deriva en una diferencia en el área seca de la playa entre una y otra.



Figura 1: Localización de la Playa de la Magdalena. Santander, Cantabria.



Figura 2: Toponimia global del área de estudio.



Figura 3: Toponimia local del área de estudio. En azul, la parte de la playa capturada con la cámara 1, en rojo la parte capturada por la cámara 2.

2.2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA

La Playa de la Magdalena históricamente ha sido y sigue siendo un gran atractivo turístico del municipio de Santander.

En el estudio de Asla Torralbo, 2015, se muestra como dicha playa ha presentado problemas constantes a lo largo de los años, ya que existe una erosión neta de arena debido a los temporales invernales que dejan la playa sin arena para un uso adecuado en los meses estivales. Esta erosión se da en la zona del Restaurante Balneario de la Magdalena, la cual provoca un transporte de arena hacia el sur de la playa. Esta arena comienza a acumularse en el Muelle del Promontorio de San Martín, pero debido a que no se dispone de una suficiente longitud de apoyo en el perfil transversal de la playa, esta arena se pierde en la Bahía de Santander.

Este problema se muestra en la figura 4, la cual es una ortofoto aérea de la Playa de la Magdalena tomada el 31 de marzo de 2011, al final de los meses de invierno. En dicha figura se observa como en la zona del Restaurante Balneario de la Magdalena no se dispone de playa seca debido a la erosión. Por otro lado, se aprecia una acumulación de arena en la zona del Muelle del Promontorio de San Martín, en el límite sur de la playa.

En la figura 5 se muestra una ortofoto aérea de la playa del 8 de septiembre de 2011, al final de los meses de verano. En dicha fecha se disponía de playa seca en la zona del Restaurante Balneario de la Magdalena, lo cual es debido a un aporte de arena llevado a cabo entre los meses de invierno y verano (en junio de 2018). Este aporte de arena era procedente de la parte sur de la playa. A su vez, en el Muelle del Promontorio de San Martín se encuentra una acumulación de arena, pero en este caso menor que la observada en la figura 4, debido a la pérdida constante de arena y al movimiento artificial de la arena llevado a cabo del sur al norte de la playa.



Figura 4: Ortofoto aérea de la Playa de la Magdalena, 31 de marzo de 2011. Google Earth, NOAA.



Figura 5: Ortofoto aérea de la Playa de la Magdalena, 8 de septiembre de 2011. Google Earth, NOAA.

Para solucionar el problema mencionado, la Universidad de Cantabria llevó a cabo un estudio para analizar el futuro de la Playa de la Magdalena, y plantear posibles soluciones frente al problema de erosión.

Después de plantear tres distintas soluciones frente al problema, se les permitió a los ciudadanos elegir mediante votaciones online la alternativa deseada, y así se decidió el proyecto para estabilizar la Playa de la Magdalena. El nombre del proyecto es la Estabilización del sistema de playas Magdalena-Peligros.

Como se muestra en Asla Torralbo, 2015, el proyecto seleccionado dispone de un dique frente al Restaurante Balneario de la Magdalena, el cual se compone de dos alineaciones. La primera alineación tiene una orientación de S15°E, y dispone de 130 metros de longitud, mientras que la segunda, con la misma cota de coronación que la primera, dispone de 65 metros de longitud con una orientada al S44°W. Este dique trata de solucionar el problema de erosión frente al Restaurante Balneario de la Magdalena, aportando una zona de sombra para impedir el transporte de arena hacia el sur donde se acaba perdiendo.

Por otro lado, también se disponía en el proyecto de la construcción de espigones en el Muelle del Promontorio de San Martín. Un primer espigón exterior que sigue la alineación del muelle, y otro perpendicular a la dirección del flujo medio de energía del oleaje. Finalmente, es necesaria la construcción de un dique sumergido, el cual tiene su punto de inicio en la unión entre los dos espigones de San Martín, y está orientado a N69ºE. Dispone de una longitud de 75m, y su cota de coronación se encuentra un metro por encima del 0 del Puerto de Santander. La finalidad de este dique es contener la planta de la playa, generando un menor impacto visual.

Las características descritas en los dos párrafos anteriores se muestran en la figura 6.

Es necesaria una regeneración, la cual requiere de un aporte de 48000 metros cúbicos de arena, para que la playa alcance su forma en planta de equilibrio final. Este proyecto disponía de un plazo de 7 meses.

Las obras comenzaron en enero del año 2018, cuando el proyecto se puso en marcha, y se comenzó con la construcción del dique de la Magdalena.

El 7 de febrero de 2018 se hizo un aporte de arena de cantidad desconocida en la zona central de la playa, frente al Restaurante Balneario de la Magdalena, para permitir el paso de maquinaria por la misma. Véase figura 7 (arriba).

El 3 de mayo de 2018 se llevó a cabo un aporte de arena de cantidad desconocida en frente del Restaurante Balneario de la Magdalena, y el 16 de mayo del mismo año se hizo otro aporte de arena, esta vez en el dique, entre las playas de la Magdalena y Bikinis. Véase figura 7 (izquierda y derecha respectivamente). Se conoce que, entre ambos aportes, el volumen total fue de 10120 metros cúbicos de arena (Comunicación personal: Demarcación de Costas).

El 4 de mayo de 2018 se terminó la construcción del primer dique, el cual se encontraba frente al Restaurante Balneario de la Magdalena. Véase figura 7 (izquierda).

La obra se detuvo en los meses estivales, para evitar posibles molestias a los usuarios de la playa. Pero la obra no se reanudó, debido a la suspensión temporal total e indefinida de las obras. Esta suspensión fue generada debido a múltiples manifestaciones en contra de las obras, y a su vez, un cambio de partido al poder del municipio. Por lo tanto, ya que para la estabilización de la Playa de la Magdalena era necesaria la construcción de los espigones y el dique sumergido de San Martín, la playa sigue en desequilibrio actualmente, aún con la construcción del primer dique. Véase figura 8.



Figura 6: Proyecto de estabilización del sistema de playas Magdalena-Peligros. Fuente: Gobierno de España, Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico.



Figura 7: Arriba, imagen de la cámara 1, 7 de febrero de 2018, 15:39. A la izquierda, imagen de la cámara 1, 3 de mayo de 2018, 10:29. A la derecha, imagen de la cámara 2, 16 de mayo de 2018, 12:59.

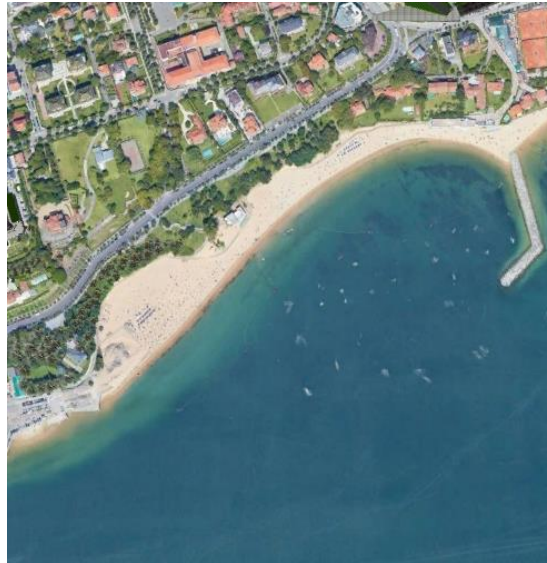


Figura 8: Ortofoto aérea de la Playa de la Magdalena, 19 de agosto de 2018. Google Earth, NOAA.

2.3 SISTEMA DE CÁMARAS

En los últimos años, los distintos métodos de teledetección entre los cuales se encuentra la videometría, están siendo desarrollados con el objetivo de medir e investigar la morfología e hidrodinámica de las zonas litorales en escalas espaciales que van del orden de cm a km y temporales que transcurren desde segundos hasta años. Concretamente, los sistemas costeros de videometría han sufrido un despliegue importante debido, por un lado, a las diversas y posibles aplicaciones que puede presentar, y por otro, debido a su bajo coste y su forma de medición autónoma.

Para nuestro caso de estudio, el IH Cantabria instaló una estación de observación en la Playa de la Magdalena con 3 cámaras de video que capturan imágenes de la zona. Véase figura 9. Actualmente, se cuenta con las series de imágenes *timex*, *var* y *snap*, de las 3 cámaras desde octubre del 2017 a diciembre del 2019 a una frecuencia de 10 minutos. A continuación, se describen las características principales de los 3 tipos de imágenes:

- Imagen *snap* (instantánea): es una imagen en 2D que muestra la información en el instante de captura.
- Imagen *timex* (promediada): integra fotos *snap* cada segundo durante 10 minutos. La información derivada de dicha imagen facilita la detección, por ejemplo, de la zona de rotura y la línea de costa.
- Imagen *var* (varianza): resalta las zonas con mayor varianza de los píxeles de la integración de fotos *snap* cada segundo durante 10 minutos.

Las cámaras se ubican al este del Restaurante Balneario de la Magdalena (figura 3), y están orientadas en distintas direcciones para abarcar tanto la Playa de la Magdalena como la Playa de Bikinis. Puesto que el presente estudio se basa en el análisis de la primera playa, se van a utilizar las cámaras 1 y 2, ya que la abarcan al completo. La cámara 2 capta una pequeña parte de la playa, específicamente, la parte norte, comenzando desde el espigón, mientras que la

cámara 1 captura la zona sur de la playa (figura 3). Por otro lado, la cámara 3 captura la Playa de Bikinis. Véase figuras 10, 11 y 12.

El sistema de cámaras capta los tres tipos de imágenes cada 10 minutos, por lo que se dispone de imágenes separadas por un intervalo de tiempo de 10 minutos.

El estudio se va a llevar a cabo con la información otorgada por las imágenes *timex*, es decir, las imágenes promediadas, ya que estas proporcionan información de la línea de costa, gracias a su promediado de imágenes cada segundo durante 10 minutos.



Figura 9: Estación de monitorización de la Playa de la Magdalena.



Figura 10: Imágenes snap (izquierda) y timex (derecha) capturadas por la cámara 1. 29 de septiembre de 2019, 10:49.

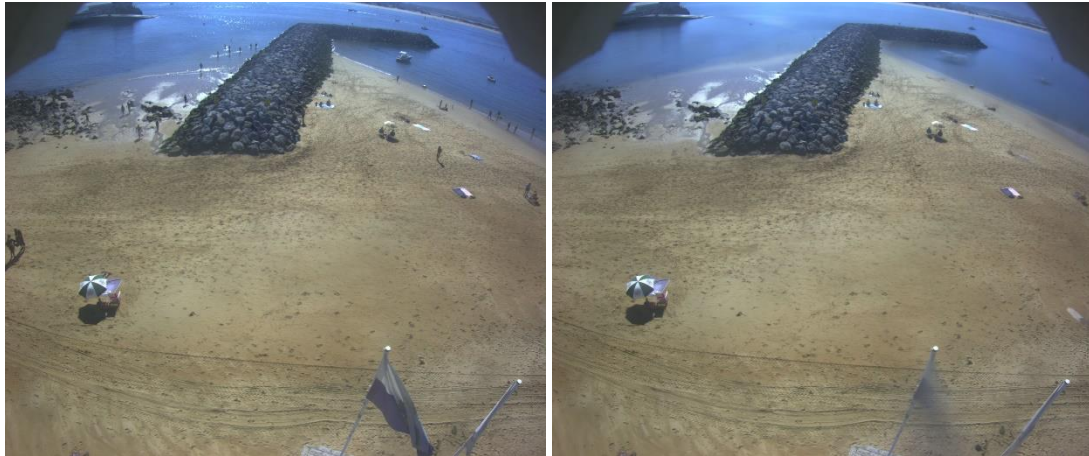


Figura 11: Imágenes snap (izquierda) y timex (derecha) capturadas por la cámara 2. 29 de septiembre de 2019, 10:49.



Figura 12: Imágenes snap (izquierda) y timex (derecha) capturadas por la cámara 3. 15 de mayo de 2018, 8:29.

2.4. BATIMETRÍA

Se cuenta con una batimetría de detalle de la Playa de la Magdalena, medida el 29 de septiembre de 2019, el cual fue un día de marea viva equinoccial, y la toma de datos se llevó a cabo en el instante de bajamar, por lo que se conocen los datos de gran parte de la playa.

Esta batimetría se obtuvo en una salida de campo, y los datos se tomaron mediante GPS recorriendo la playa con los aparatos mostrados en la figura 13, donde a la izquierda se muestra el GPS, y a la derecha se muestra una rueda móvil mediante la cual se recorría la playa y se iban tomando puntos con coordenadas x, y, z.

En la figura 14 se muestra la batimetría medida del 29 de septiembre de 2019, donde se aprecia como esta es paralela a la costa y no muestra irregularidades a lo largo de la zona de estudio.



Figura 13: GPS y rueda móvil de toma de datos "in situ" de la batimetría el 29 de septiembre de 2019.

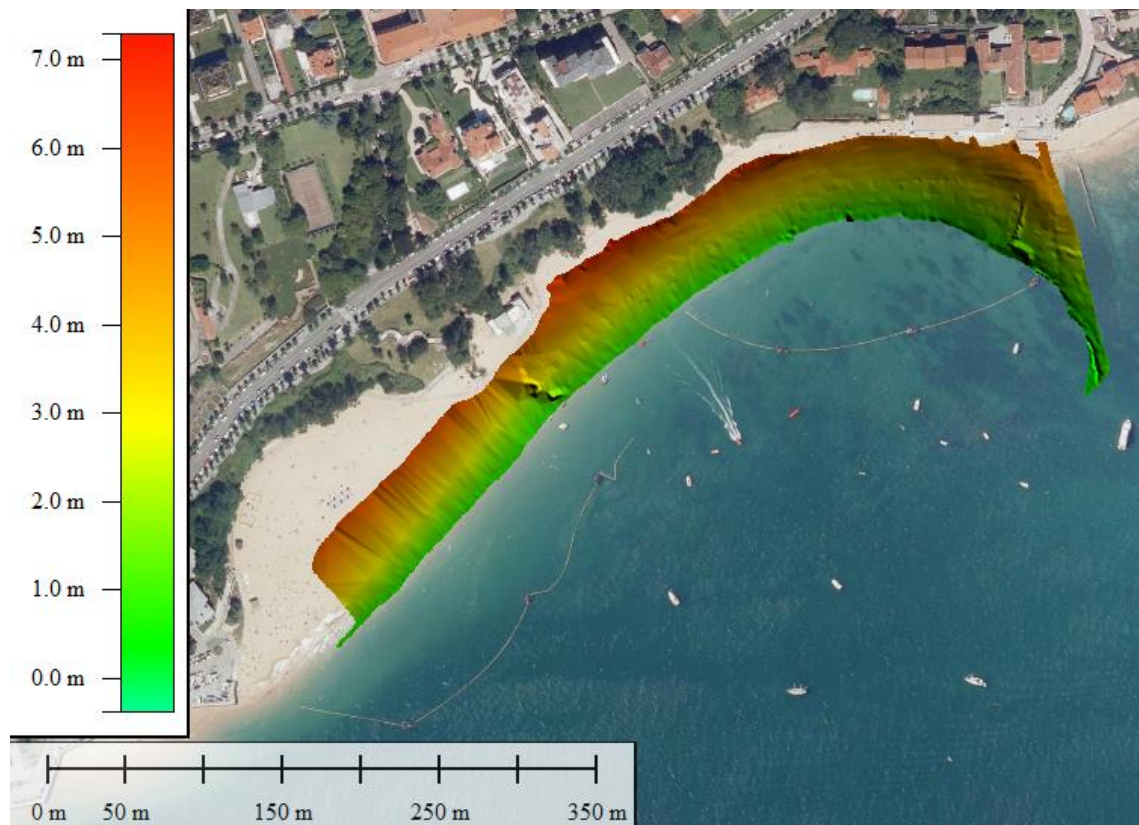


Figura 14: Batimetría medida "in situ" el 29 de septiembre de 2019.

2.5. DINÁMICAS MARINAS

La dinámica marina es un factor relevante en cualquier estudio costero, y se puede dividir en dos partes, oleaje y nivel del mar. En el presente apartado se llevará a cabo una breve descripción de ambas, comenzando con el oleaje y siguiendo con el nivel del mar.

2.5.1. OLEAJE

La Playa de la Magdalena se encuentra ubicada dentro de la Bahía de Santander, por lo que se encuentra protegida del clima marítimo exterior, pero a su vez, está influenciada por el oleaje local, generado dentro del interior de la Bahía. La Bahía de Santander dispone de un fetch suficientemente largo para que una acción del viento constante pueda generar el oleaje y alcanzar la playa. Por lo tanto, el oleaje que alcanza la playa es de baja intensidad y está caracterizado por alturas de ola pequeñas.

Como describe Asla Torralbo, 2015, queda de manifiesto que el oleaje con mayor frecuencia de presentación es del sector SE en el caso del oleaje procedente del exterior. En el caso del oleaje generado dentro de la bahía, el oleaje con mayor frecuencia de presentación es del sector ESE, seguido por el sector SSW y por el SW. Sin embargo, los oleajes más energéticos provienen del SSW y del SW, ya que estos oleajes son generados con un fetch mayor.

Estos oleajes derivan en unas corrientes de norte a sur a lo largo del sistema de playas, cuya magnitud aumenta en caso de temporal.

2.5.2. NIVEL DEL MAR

El nivel del mar se define como la posición media de la superficie libre del mar, definida por la meteorología y los movimientos astronómicos. La oscilación del nivel medio de mar asociada principalmente a la evolución de la presión y el viento (factores meteorológicos), tiene carácter aleatorio, y se denomina marea meteorológica. Por otro lado, la oscilación del nivel del mar asociada a los movimientos astronómicos tiene carácter determinista y se le denomina marea astronómica. La suma de ambas mareas es el nivel del mar.

Se dispone de datos del mareógrafo de Santander, el cual está gestionado por el Puerto de Santander, y este dispone de datos cada minuto, desde enero de 2014 hasta marzo de 2020. Véase figura 15.

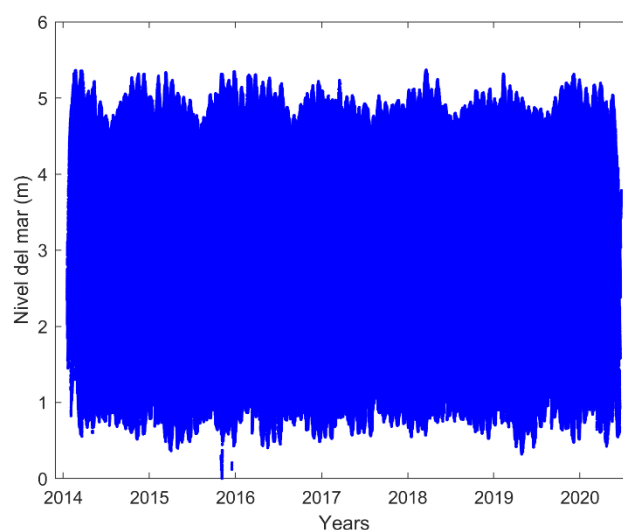


Figura 15: Serie temporal del mareógrafo de Santander.

Tomando los datos disponibles de la serie del nivel del mar, se obtiene el valor máximo y el valor mínimo de la serie, siendo estos de 5.369m el 3 de marzo de 2018 a las 04:16 de la madrugada y 0.002m el 15 de octubre de 2015 a las 05:15 de la madrugada respectivamente.

Analizando el régimen medio del nivel del mar, mediante los datos disponibles, se obtienen los siguientes valores representativos que se utilizarán posteriormente en el estudio. El percentil del 95% se encuentra asociado a un nivel del mar de 4.5m, el percentil del 50%, se corresponde a un nivel del mar de 2.9m, y finalmente, el percentil del 5% se asocia a un nivel del mar de 1.25m. Estos valores representan que el 5% de las veces se superan los 4.5m, el 50% de las veces se superan los 2.9m, y que el 95% de las veces el nivel del mar es mayor a 1.25m.

Se dispone de 7 años de datos del nivel del mar, aunque para el presente estudio solo se van a utilizar los datos entre octubre de 2017 y diciembre de 2019, debido a que es donde se dispone de imágenes capturadas mediante el sistema de cámaras.

3. METODOLOGÍA

3.1. INTRODUCCIÓN

En el presente estudio se desarrollará, implementará y validará la metodología de obtención de la batimetría para analizar la evolución morfológica de la Playa de la Magdalena durante el proyecto de la Estabilización del sistema de playas Magdalena-Peligros y la situación posterior a la suspensión del proyecto.

Para ello, se analizará una serie de batimetrías obtenidas a partir de imágenes por medio de la metodología descrita en el presente capítulo. Esta metodología será calibrada y validada en la Playa de la Magdalena comparándola con la batimetría real obtenida el 29 de septiembre de 2019.

La metodología se basa en la obtención de la batimetría intermareal y submareal, a partir de imágenes *timex* oblicuas de la playa.

Las batimetrías obtenidas serán de un día en específico, ya que es como se va a trabajar el modelo batimétrico, en periodos de una batimetría diaria.

A continuación, se procederá a describir la metodología de obtención de la batimetría, y dentro de ella, la implementación, el proceso de calibración, validación y estimación de la batimetría diaria generada, y la validación de dicha metodología comparándola con la batimetría medida de la Playa de la Magdalena.

Por último, una vez calibrada y validada la metodología, se obtendrán las batimetrías de la playa en distintos días, para poder llevar a cabo un análisis a largo plazo de la evolución morfológica de la playa.

3.2. METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN DE LA BATIMETRÍA

3.2.1. INTRODUCCIÓN

La metodología empleada para llevar a cabo el presente estudio trata por separado la batimetría intermareal y la batimetría submareal.

La batimetría intermareal es la zona de la playa limitada por la línea de costa en pleamar por su parte superior y por la línea de costa en bajamar por su parte inferior. Esto representa que dicha zona de la playa estará inundada en condiciones de pleamar, y quedará visible en condiciones de bajamar.

La batimetría intermareal se obtiene por medio de la detección de líneas de costa en las imágenes *timex* obtenidas de la estación de monitoreo de la Playa de la Magdalena.

La batimetría submareal es la zona de la playa ubicada debajo del nivel del mar en condiciones de bajamar. Es la parte de la playa inundada, por lo tanto, una parte de la playa escondida para el ojo humano.

Para obtener la batimetría submareal, se establecerá un modelo basado en las Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs), las cuales están descritas en el Anexo I.

3.2.2. BATIMETRÍA INTERMAREAL

Como se ha descrito anteriormente, la batimetría intermareal es la zona de la playa entre el límite de pleamar y el límite de bajamar, por lo que es una zona donde la línea de costa está en constante movimiento en la coordenada vertical. La línea de costa se encuentra en la altura determinada por el nivel del mar en un instante específico, por lo que, disponiendo de una imagen y el nivel del mar en el mismo instante, es posible determinar una línea batimétrica a la altura del nivel del mar.

Por lo tanto, disponiendo los valores del nivel del mar del mareógrafo de Santander a lo largo del tiempo e imágenes de la estación de monitoreo, se pueden detectar las líneas de costa a lo largo del día y adjuntarles una cota batimétrica que será el valor del nivel del mar correspondiente al instante de cada imagen. Mediante las líneas de costa detectadas en dicho día, se podrá formar la batimetría intermareal para el día de estudio.

La detección de la línea de costa se llevará a cabo mediante el IHOLLin, el cual es una herramienta desarrollada por el IHCantabria para detectar la línea de costa en una imagen. Esta detección se lleva a cabo mediante las Funciones Empíricas Ortogonales, las cuales están descritas en el Anexo I. Además, esta técnica queda descrita en el estudio de Echenique Santisteban, 2016.

En la técnica citada, la línea de costa está definida como el contorno de valor 0 del segundo modo espacial de la imagen (U_2), el cual separa la zona de agua y la zona de arena. Por lo tanto, la línea de costa, LC, queda definida como $LC=[u(U_2=0) \vee (U_2=0)]$. Donde U_2 es el segundo modo espacial de la imagen, obtenido aplicando la técnica de las Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs), y representa la zona de mayor variabilidad de la imagen, mientras que u y v corresponden a las coordenadas espaciales de la imagen. Esta metodología se encuentra implementada en la herramienta IHOLLin.

Una vez descrita la herramienta de detección, es necesario explicar el proceso y el post proceso aplicado a los datos:

- **Aplicación.** La herramienta detecta automáticamente la línea de costa ($U_2 = 0$), por lo que otorga la línea de costa en los valores de U_2 iguales a 0. Sin embargo, en algunas ocasiones es necesario modificar ligeramente el valor de U_2 , para obtener el ajuste más adecuado, ya que la línea de costa no se encuentra exactamente en el valor 0. Así se obtienen los valores u y v de las líneas de costa en cada imagen, las cuales están asociadas a un valor Z representativo del nivel del mar en el instante de la imagen.
- **Filtrado.** Cuando en una imagen, al modificar el valor de U_2 para obtener un buen ajuste de la línea de costa no era posible representarla correctamente, las imágenes se descartaban. Cabe destacar que esto no supone un problema, puesto que se dispone de imágenes cada 10 minutos. Los principales problemas derivados en descartes de imágenes son debidos a que no se puede detectar una línea de costa que no es visible en la imagen. A continuación, se muestran unos ejemplos:
 - Visualización de la línea de costa: Las imágenes que impiden visualizar correctamente la línea de costa debido al reflejo provocado por el sol han sido descartadas, ya que generan datos de U_2 erróneos, impidiendo una correcta detección. A su vez, las imágenes nocturnas, en las cuales no se dispone de luz también son descartadas.

- Arena mojada: Durante el descenso del nivel del mar, es decir, en marea decreciente, se crea una diferencia de colores entre la arena seca y la arena mojada (generada por el paso decreciente del nivel del mar). El límite entre ambas genera cambios significativos en la matriz del segundo modo espacial, U_2 , generando datos erróneos, impidiendo una correcta detección de la línea de costa.
- Imágenes en pleamar: Esta limitación es debida a las zonas llanas o de muy baja pendiente, donde se forma una “balsa de agua”, en la cual no es posible detectar la línea de costa debido a su gran amplitud.
- **Suavizado de las líneas de costa.** Las líneas de costa obtenidas para cada imagen presentan ciertas irregularidades debidas a el paso de personas por la línea de costa, las sombrillas que ocultan partes de la línea de costa, tablas de surf etc. Por lo tanto, las zonas donde se encuentran dichos elementos no han de detectarse, es decir, no deben aparecer como datos obtenidos, debido a que son irregularidades aleatorias que no se pueden controlar. Véase figura 16.

Mediante el proceso descrito, se obtienen los datos de la batimetría intermareal en el día de estudio, los cuales son representados mediante las líneas de costa obtenidas en las distintas imágenes, con su correspondiente nivel del mar en el instante de la captura de la imagen.

Por lo tanto, como resultado se obtiene un conjunto de coordenadas u y v que representan un nivel del mar constante en la imagen.

La batimetría intermareal obtenida con el procedimiento descrito tiene dos usos dentro de la metodología planteada: el primero y más evidente es proporcionar la información batimétrica de la zona intermareal en un día en específico, y el segundo, servir de datos de entrada para realizar la calibración del modelo batimétrico para la obtención de la batimetría submareal de la playa, tal y como se describirá a continuación.



Figura 16: Imagen timex de la cámara 1 del 29 de septiembre de 2019. A la izquierda la imagen con la línea de costa detectada mediante el IHollin, a la derecha la línea de costa suavizada en la misma imagen.

3.2.3. BATIMETRÍA SUBMAREAL

Como se ha mencionado anteriormente, la batimetría submareal y la batimetría intermareal se obtienen por separado, pero esta segunda se utiliza para calibrar el modelo batimétrico de estimación de la batimetría submareal que se describe en este apartado.

Hay que recordar que la batimetría submareal es la parte de la batimetría que se encuentra por debajo del nivel de bajamar, es decir, una zona sumergida por el agua.

3.2.3.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO BATIMÉTRICO

El modelo que se plantea en el presente estudio para obtener la batimetría submareal es un nuevo planteamiento del cual no se dispone de estudios anteriores. Aunque por otro lado, se dispone de otros planteamientos para la obtención de dicha batimetría, como por ejemplo, Bergsma *et al.*, 2016, donde se propuso un modelo (Cbathy), basado en la obtención de la batimetría mediante la relación inversa de la ecuación de la dispersión.

Se comienza con el planteamiento de una serie de hipótesis fundamentales para el modelo, primero, se define la existencia de una función capaz de representar “lo que se ve en la imagen”, en el área sumergida de agua. Esta función depende de un número muy elevado de factores, entre los que se pueden destacar: 1) parámetros batimétricos, principalmente el tipo de fondo (arena, algas, rocas...), la pendiente, el tamaño de sedimento, la profundidad... 2) parámetros oceanográficos, por ejemplo, el oleaje presente, el nivel del mar, la turbidez, la penetración de la luz en la columna de agua... 3) parámetros atmosféricos, por ejemplo, la visibilidad atmosférica, la luz, la hora del día, la orientación del sol, la presencia de lluvia, la neblina, las nubes... 4) parámetros geométricos, como los relacionados con la configuración geométrica de la estación, la orientación de la playa, la distancia entre la estación y el objetivo, y las características de las cámaras.

Por lo tanto, esta función que representa “lo que se ve en la imagen”, se puede resumir de la siguiente manera:

$$f(x, t) = f(\text{Batimetría}, \text{Condiciones Atmosféricas}, \text{Condiciones Oceanográficas}, \\ \text{Condiciones geométricas})$$

Continuando con el desarrollo del modelo, cabe destacar que los parámetros mencionados previamente, dependen de diversas variables, pero se asume que estas varían lentamente en el tiempo, y que los cambios en la batimetría de una playa para cada día o ciclo de marea son despreciables.

Una manera de representar “lo que se ve en la imagen” es mediante el segundo modo espacial, U_2 , cuya obtención ha sido descrita en el Anexo I. Además, se asume este contiene parcialmente información sobre la batimetría, por lo tanto, se puede asumir que $f(x, t) = U_2(x, T)$ para un momento dado, T, por lo que teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, se puede representar de la siguiente manera:

$$U_2 = f(\text{Batimetría}, \text{Condiciones Atmosféricas}, \text{Condiciones Oceanográficas}, \\ \text{Condiciones geométricas})$$

Al final del Anexo I se muestra un ejemplo de la representación del segundo modo espacial, U_2 , en la Playa de la Magdalena.

Para el modelo que se va a desarrollar, se van a simplificar los parámetros, es decir, se asume que, dentro de los parámetros batimétricos, el que tiene mayor contribución a la función es la profundidad (Z), por lo que $f(\text{Batimetría}) = A_1 * Z$. Entre los parámetros atmosféricos, la cantidad y distribución de luz en la imagen son los más significativos, por lo que se asume que

$f(\text{Condiciones atmosféricas}) = A_2 * Ig$, donde Ig es el valor de intensidad de la luz en la imagen, definido por valores de tonalidades grises entre 0 y 1 de cada píxel de la imagen. Entre los parámetros oceanográficos, los más significativos son la turbidez y refracción del agua, los cuales inicialmente, no se tendrán en cuenta para este modelo. Finalmente, es necesaria la implementación de un último parámetro, A_3 , el cual permita desplazar en coordenadas verticales los valores del segundo modo espacial para poder relacionarlos con la batimetría, la cual queda referenciada respecto a 0. De esta forma, se puede describir un modelo lineal tal que:

$$U_2 = A_1 * Z + A_2 * Ig + A_3 + E(O^2)$$

Siendo A_1 , A_2 y A_3 coeficientes de ajuste, y E el error asociado de orden 2 a dicha función.

Se asume que en esta parametrización la profundidad es el factor dominante, al menos hasta una profundidad límite, que denominaremos h' .

En el presente estudio, para determinar la importancia de los parámetros atmosféricos se resolverá el modelo considerando solamente los parámetros batimétricos, y posteriormente considerando ambos.

Por lo tanto, el modelo puede escribirse como se muestra arriba en su versión completa, o como:

$$U_2 = A_1 * Z + A_3 + E(O^2)$$

en su versión simplificada, siendo,

Z : Profundidad de cada línea de costa desde nivel del mar de la imagen seleccionada obtenida mediante las líneas de costa. Cabe destacar que esta profundidad es constante para cada línea de costa, y que representa la batimetría.

U_2 : Modo espacial asociado a la variabilidad de la imagen, interpolado en las coordenadas u y v de cada línea de costa.

A_1 : Coeficiente de ajuste asociado al modo espacial U_2 .

A_3 : Coeficiente de ajuste asociado a la referencia del modo espacial U_2 .

E : Error asociado.

Antes de poder utilizar el modelo para estimar la batimetría submareal, es necesario calibrar los coeficientes previamente descritos. El proceso de calibración aprovecha el hecho de que la batimetría intermareal, la cual se obtiene de la forma descrita en el apartado anterior, es batimetría submareal en el instante de pleamar, ya que esta se encuentra sumergida en agua. A su vez, en el instante previo a la pleamar, la parte de la batimetría intermareal que se encuentra por debajo del nivel del mar también es batimetría submareal, y así sucesivamente, en dichos instantes se conoce la batimetría submareal, ya que se disponen los datos de la batimetría intermareal que se encuentran sumergidos en el agua. A medida que el nivel del mar va descendiendo, el área donde se conoce la batimetría submareal va disminuyendo hasta llegar al instante de bajamar, donde se desconocen los datos sobre la batimetría submareal debido a que la batimetría intermareal conocida llega hasta la línea de costa en bajamar.

Por lo tanto, como se mostrará a continuación en el próximo apartado, la aplicación del modelo contará con 3 etapas o partes: 1) calibración con los datos de la batimetría intermareal, 2)

estimación de la batimetría, y 3) validación donde se comparará la estimación llevada a cabo en la etapa 2) con los datos de la batimetría intermareal obtenidos en el apartado anterior.

3.2.3.2. APLICACIÓN DEL MODELO

Para poder aplicar el modelo, y así estimar la batimetría submareal, primero es necesario calibrarlo con los datos de la batimetría intermareal que se han obtenido previamente. Esta calibración aportará una profundidad límite a la cual se le denominará h' , hasta la cual el modelo estima correctamente la batimetría submareal.

El modelo estimará la batimetría desde el nivel del mar correspondiente a cada imagen hasta el propio nivel del mar menos la profundidad límite definida en el apartado de calibración, por tanto, una parte de dicha estimación servirá para poder validar el modelo con los datos de la batimetría intermareal que no se han utilizado para calibrar el modelo. La otra parte de la estimación será una estimación neta donde ya no se dispone de datos sobre la batimetría intermareal, y por lo tanto será la estimación de la batimetría submareal de la playa.

A modo de resumen, en la figura 17, se muestra un esquema sobre la calibración, validación y estimación de la batimetría mediante el modelo. En dicha figura se muestra una serie de nivel del mar en azul, donde los puntos rojos representan las imágenes de las cuales se dispone en dicho ciclo de marea. Como se ha mencionado anteriormente, con dichas imágenes se obtienen líneas de costa asociadas a un determinado nivel del mar, y, por lo tanto, la batimetría intermareal. Una parte de la batimetría intermareal se utilizará para la calibración del modelo y otra parte se utilizará para validar los resultados de las estimaciones, y cuando ya no se disponga de datos, se llevará a cabo la estimación neta de la batimetría submareal.

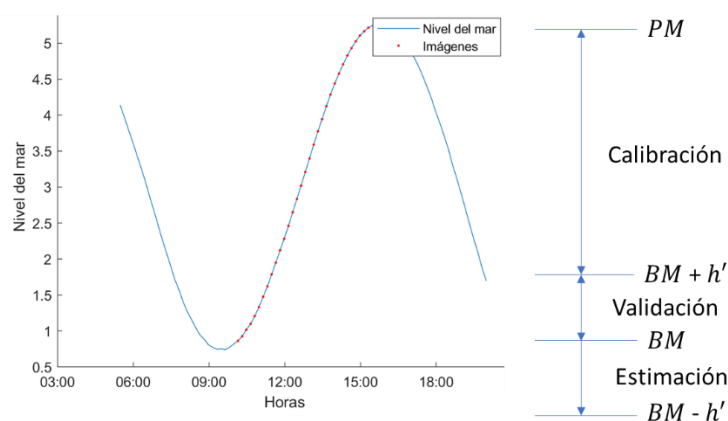


Figura 17: Esquema de la calibración, validación y estimación del modelo.

3.2.3.2.1. CALIBRACIÓN DEL MODELO BATIMÉTRICO

La calibración del modelo se lleva a cabo para cada día de estudio, es decir, se calibra para poder obtener la batimetría submareal de la playa en el día deseado.

Como se ha mencionado previamente, es un hecho que se dispone de datos de la batimetría submareal, gracias a la batimetría intermareal, la cual en una imagen de pleamar se convierte en batimetría submareal. Mediante los dichos datos, es posible calibrar el modelo. Por lo tanto,

para cada imagen seleccionada se dispone de una batimetría submareal con la que se pretende calibrar el modelo.

Para calibrar el modelo, se van a utilizar los datos derivados de la batimetría intermareal, es decir, la profundidad a la que se encuentra cada línea de costa respecto al nivel del mar en la imagen seleccionada.

Una vez se dispone de datos sobre la batimetría submareal (batimetría intermareal), se procede a relacionarlos con el segundo modo espacial U_2 . Esta relación se va a obtener mediante un ajuste de mínimos cuadrados, distinguiendo las dos versiones descritas previamente, como dos métodos:

- 1. Método: La relación se obtiene teniendo en cuenta el modo espacial U_2 y la batimetría ($f(\text{Batimetría})$), datos obtenidos de la batimetría intermareal). La ecuación planteada es la siguiente:

$$U_2 = A_1 * Z + A_3 + E(O^2)$$

- 2. Método: La relación se obtiene agregando un factor de iluminación I_g al método 1, para así comparar si se produce una mejora en el modelo. La ecuación es la siguiente:

$$U_2 = A_1 * Z + A_2 * I_g + A_3 + E(O^2)$$

siendo,

Z : Profundidad de cada línea de costa desde nivel del mar de la imagen seleccionada obtenida mediante las líneas de costa de la batimetría intermareal. Cabe destacar que esta profundidad es constante para cada línea de costa, y que es obtenida de la batimetría submareal (batimetría intermareal).

U_2 : Modo espacial asociado a la variabilidad de la imagen, interpolado en las coordenadas espaciales de la imagen u y v de cada línea de costa.

I_g : Iluminación de la imagen, interpolada en las coordenadas espaciales de la imagen u y v de cada línea de costa.

A_1 : Coeficiente de ajuste asociado al modo espacial U_2 .

A_2 : Coeficiente de ajuste asociado a la iluminación I_g .

A_3 : Coeficiente de ajuste asociado a la referencia. Este parámetro es necesario, debido a que la referencia de la profundidad es igual a 0, mientras que no todas las líneas de costa se asociaban al valor de $U_2=0$.

Siendo E el error.

Para iniciar el ajuste, primero es necesario aplicar un post proceso a los parámetros mencionados arriba.

Los parámetros de U_2 e I_g han de ser interpolados en las coordenadas espaciales de la imagen u y v de cada dato de batimetría conocido, además, se les aplicará un suavizado mediante media móvil para evitar cambios bruscos en su tendencia.

Para poder resolver dichas ecuaciones, ya que se dispone de más de una incógnita para una sola ecuación, se va a aplicar el método del ajuste por cuadrados mínimos, el cual se basa en minimizar el error cuadrático medio.

El procedimiento para llevar a cabo el ajuste por cuadrados mínimos es similar en ambos métodos, ya que se diferencian solamente en un factor. Ya que el método 2 dispone de dicho parámetro extra, se va a explicar el procedimiento aplicado en dicho método, teniendo en cuenta que para el método 1 se ha llevado a cabo el mismo procedimiento sin tener en cuenta dicho parámetro.

Se dispone de tres parámetros conocidos (Z, U_2, I_g), y tres coeficientes que actúan como incógnitas (A_1, A_2, A_3), y el objetivo es disminuir el error al mínimo con distintos valores de dichas incógnitas. Partiendo de la ecuación:

$$U_2 = A_1 * Z + A_2 * I_g + A_3$$

Se obtiene

$$Z = \frac{1}{A_1} * U_2 + \frac{A_2}{A_1} * I_g + \frac{A_3}{A_1}$$

Donde se redefine

$$\alpha = \frac{1}{A_1}; \beta = \frac{A_2}{A_1}; Z_0 = \frac{A_3}{A_1};$$

Esta ecuación se va a transformar en la siguiente ecuación:

$$y = A * x$$

siendo,

$$A: \text{Datos} \rightarrow A = [U_2, I_g, 1]$$

$$x: \text{Incógnitas} \rightarrow x = [\alpha, \beta, Z_0]$$

$$y: \text{Resultados} \rightarrow y = Z$$

A continuación, se lleva a cabo una división matricial entre los datos y los resultados de la siguiente forma:

$$X_m = A \backslash y$$

Obteniendo,

$$\alpha = X_m(1)$$

$$\beta = X_m(2)$$

$$Z_0 = X_m(3)$$

Una vez aplicado el ajuste por cuadrados mínimos, se obtienen los coeficientes previamente mencionados, y con ellos, la profundidad calculada con el modelo (Z_m):

$$Z_m = \alpha * U_2 + \beta * I_g + Z_0$$

$$Z = Z_m + E$$

Siendo E el error entre la profundidad obtenida de la batimetría intermareal (Z) y la profundidad obtenida mediante el modelo (Z_m) con el ajuste por cuadrados mínimos.

Por lo tanto, se dispone de un coeficiente α , un coeficiente β , un coeficiente Z_0 y un error E para cada profundidad (h') con la que se ha calibrado el modelo en cada imagen.

Una hipótesis descrita en el planteamiento del modelo se basa en que existe una profundidad límite, h' , hasta la cual la batimetría es dominante, por lo que ha de definirse dicha profundidad para obtener los parámetros asociados.

Por lo tanto, se plantea un escenario en el cual al variar la profundidad de calibrado de mayor a menor el error se torna constante en una profundidad límite a la cual se le denominará h' . Cada imagen, y por lo tanto cada nivel del mar, dispondrá de su propia profundidad límite, y tanto de los coeficientes asociados como del error asociado a dicha profundidad.

Con esta afirmación se obtienen los parámetros necesarios en un día en concreto, ya que estos irán variando para cada imagen, y por tanto nivel del mar, en el día seleccionado.

La calibración del modelo se llevará a cabo hasta cierta imagen, correspondiente a un nivel del mar al cual denominaremos “k”. A partir de esta se comenzará a estimar la batimetría. Hasta que imagen o nivel del mar se calibrará el modelo dependerá de la profundidad límite h' que se defina. La obtención de esta profundidad límite se explicará en el siguiente apartado, donde se describe la estimación de la batimetría del modelo. Cuando no se disponga de datos de la batimetría intermareal por debajo del nivel del mar (k) de la imagen menos la profundidad límite, con los cuales calibrar el modelo, se comenzará a estimar la batimetría, y por lo tanto, la calibración del modelo habrá finalizado, debido a que la calibración de los parámetros del modelo se está haciendo desde el nivel del mar (k) hasta el nivel del mar menos dicha profundidad, por lo que si no se dispone de los datos en esa zona, la calibración será errónea.

Un resumen de cómo se lleva a cabo la calibración del modelo se muestra en la figura 18, donde se encuentra representado el ejemplo del ajuste de parámetros en la imagen de pleamar, siendo necesario repetirlo para cada una de las imágenes con datos disponibles de la batimetría intermareal por debajo del nivel del mar correspondiente a dicha imagen. El contorno azul representa el agua, mientras que el contorno amarillo representa la arena. En la figura se muestra como lo que en la imagen de bajamar es batimetría intermareal (parte izquierda de la figura), en la imagen de pleamar es batimetría submareal (parte derecha de la imagen), ya que se encuentra sumergida en el agua (contorno azul), con la cual ha de calibrarse el modelo. Por lo tanto, variando la profundidad de calibración en cada imagen ($Z_1, Z_2, Z_3 \dots Z_n$) se obtienen los parámetros de calibración ($\alpha_n, \beta_n, Z_{0n}$) y el error asociado (E_n) para cada una de las profundidades (Z_n). En la parte baja de la figura, se muestra como los parámetros seleccionados serán los correspondientes a la profundidad (Z_n) en la cual se torne constante el error (E_n), a la cual se le denomina profundidad límite (h'). Repitiendo el proceso para cada una de las imágenes se termina calibrando el modelo.

Es importante destacar que, a la hora de calibrar, se ajustan las profundidades de las líneas de costa, respecto al nivel del mar en cada imagen, y que no se tiene en cuenta la línea de costa de la imagen que se está analizando, cuya profundidad sería 0.

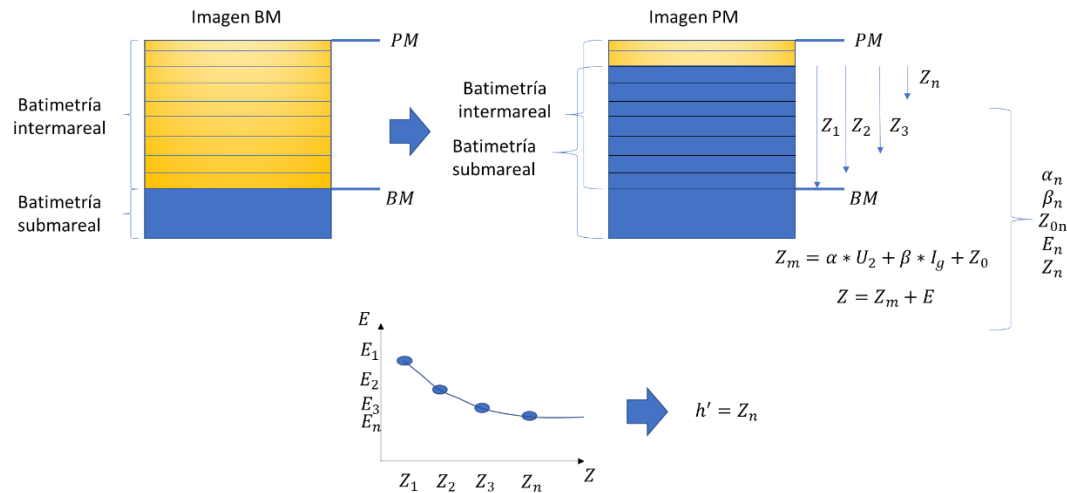


Figura 18: Esquema de calibración de la imagen de pleamar. El color amarillo representa la zona seca, el color azul la zona sumergida, las líneas azules representan la batimetría intermareal, las líneas negras la batimetría intermareal y submareal.

3.2.3.2.2. ESTIMACIÓN DE LA BATIMETRÍA

Para poder estimar la batimetría submareal, es necesario disponer de los parámetros α, β y Z_0 en la imagen de bajamar, para así poder aplicar la ecuación descrita anteriormente y predecir las profundidades de las distintas coordenadas de la imagen.

La estimación del modelo se lleva a cabo siguiendo el siguiente proceso:

- α, β, Z_0 : Se cuenta con series de los parámetros para cada imagen, desde la imagen de pleamar hasta la imagen de bajamar. En la imagen de bajamar, los parámetros han de ser estimados por medio de un ajuste a los datos conocidos. En este caso, como primera aproximación, se ha asumido una función lineal para cada parámetro. Así, en condiciones de bajamar, donde no se dispone de datos, se dispondrá de dichos parámetros para poder estimar la batimetría.
- Ecuación: La ecuación descrita anteriormente estaba hecha para obtener las profundidades de las líneas de costa, y disponía de un error asumido. A continuación, se aplica esa misma ecuación, pero en este caso para obtener la profundidad en la zona sumergida de la imagen:

$$Z_m(u, v) = \alpha * U_2(u, v) + \beta * I_g(u, v) + Z_0$$

En este caso se toman las matrices de U_2 e I_g referidas a la imagen en la zona sumergida, con datos en cada píxel (coordenadas espaciales de la imagen) de la misma. Por lo tanto, el resultado es una matriz con las coordenadas de la imagen (u, v) , con datos de profundidad respecto al nivel del mar asociado a dicha imagen.

- Filtrado: Al disponer de datos de la profundidad de la batimetría en la zona sumergida de la imagen, es necesario filtrar dichas profundidades, ya que como se ha mencionado anteriormente, existe una profundidad límite hasta la cual el modelo está capacitado para llevar a cabo una estimación fiable de la batimetría. Esta profundidad se definirá al igual que los coeficientes mediante una función lineal, obteniendo así la profundidad

límite hasta la cual se estima la batimetría en la imagen de bajamar donde ya no se dispone de datos. Se le aplicará un filtrado a las profundidades obtenidas en cada imagen para que solamente tenga en cuenta los valores inferiores a dicha profundidad respecto a su nivel del mar correspondiente.

3.2.3.2.3. VALIDACIÓN DEL MODELO BATIMÉTRICO

Para poder llevar a cabo la validación del modelo, primero es necesario estimar una batimetría mediante el modelo calibrado, para así compararla con los datos de la batimetría intermareal de los cuales se dispone en dicha zona, los cuales no han sido utilizados en el proceso de calibración.

La estimación de la batimetría se llevará a cabo de la manera descrita en el apartado anterior (estimación), y para validarla, se utilizarán los datos de batimetría intermareal de los que se disponga por debajo del nivel del mar en la imagen en la cual se está estimando la batimetría, los cuales no tienen que abarcar toda la zona de estimación, se puede validar solamente una parte de la misma.

Es importante destacar que se dispone de las líneas de costa de la batimetría intermareal, por lo que habrá que interpolar las líneas de costa para obtener una batimetría en una malla de las dimensiones de la imagen.

Para poder entender mejor estos dos últimos conceptos de validación y estimación del modelo, en la figura 19 se muestra un resumen de lo descrito en ambos apartados. Se observan dos imágenes, la imagen de arriba (PM-n, el nivel del mar en la imagen “n” veces previa a la pleamar) dispone de un nivel del mar más alto que la imagen de abajo (PM-n-1, el nivel del mar en la imagen “n-1” veces previa a la pleamar). En ambas imágenes la zona de calibración es la misma, debido a que es una zona fija que variará en función del día seleccionado, y llega hasta la imagen con la línea de costa en la cual no se dispone de datos de la batimetría intermareal a una profundidad mayor a h' ($BM + h'$).

La profundidad de estimación en ambas imágenes es h' , pero tanto la zona de validación (desde BM hasta el nivel del mar correspondiente a dicha imagen) como la de estimación neta (desde el nivel del mar correspondiente a dicha imagen hasta dicho nivel del mar menos h') son distintas en ambas imágenes. En la imagen con el nivel del mar más alto (arriba), la zona de validación es más amplia, puesto que se disponen de más datos sobre la batimetría intermareal (zona azul claro). A su vez, en dicha imagen se dispone de una zona de estimación neta más pequeña.

Finalmente, ambas estimaciones (zona azul claro más zona verde) disponen de un área conjunta, es decir, la imagen de arriba comienza a estimar desde un nivel del mar mayor que la imagen de abajo, por lo que esta termina en una altura mayor que la imagen de abajo, pero existe una zona conjunta entre ambas, la cual se utilizará para estudiar la coherencia del modelo.

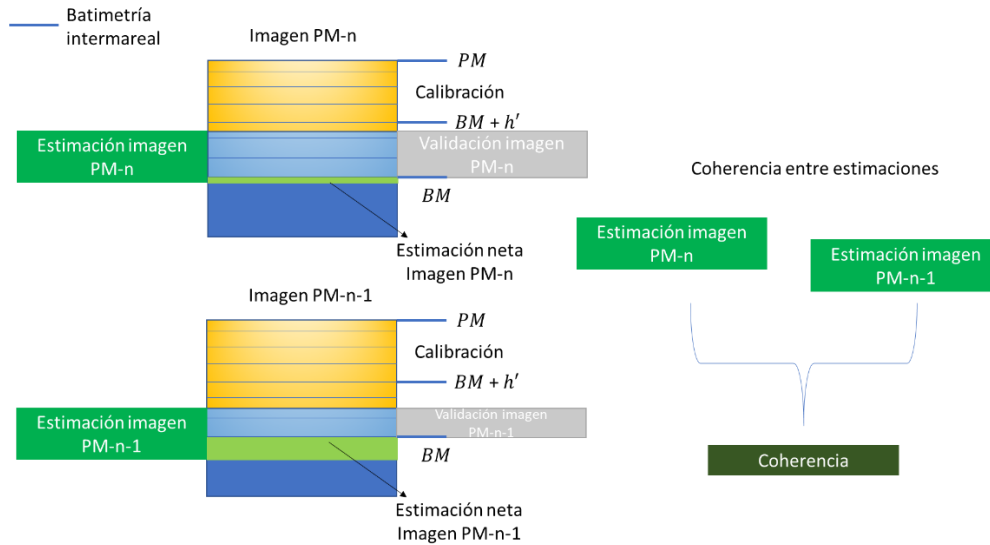


Figura 19: Esquema de la validación y estimación del modelo batimétrico. En naranja la zona seca de cada imagen, en verde las estimaciones de cada imagen, en azul claro la zona conocida de la batimetría intermareal de la zona sumergida en cada imagen, en gris la parte de validación de cada imagen, en verde claro la parte de estimación neta de cada imagen, en azul oscuro, la zona a la cual no se llega a estimar y no se dispone de datos de la batimetría intermareal. Finalmente, en verde oscuro la coherencia en la zona conjunta de la estimación de ambas imágenes.

3.2.4. RECONSTRUCCIÓN DE LA BATIMETRÍA

En el presente apartado, se muestra cómo se va a construir una batimetría de toda la playa a partir de la parte intermareal y la parte submareal, obtenidas mediante la metodología descrita. Posteriormente, se describirá brevemente el proceso de rectificación de las imágenes.

Se dispone de la batimetría intermareal de la playa, de la cual se conocen las coordenadas u y v de la imagen, y la cota referida al 0 del Puerto de Santander de cada línea de costa detectada mediante la metodología descrita. A su vez, se dispone de la imagen referida a la línea de costa de bajamar, en la cual se ha llevado a cabo la última detección de línea de costa, la cual es la línea de costa con menor cota de la que se dispone. Finalmente, la batimetría submareal se encuentra representada en coordenadas espaciales u y v de la imagen, y la cota queda representada como la profundidad respecto al nivel del mar correspondiente a dicha imagen, disponiendo de puntos en cada píxel de la imagen.

Representando estos tres elementos (batimetría intermareal, batimetría submareal e imagen referida a la bajamar), se dispone de la batimetría total de la playa.

Como se ha mencionado anteriormente, los datos se encuentran representados en coordenadas u , v y z , por lo que no se pueden comparar directamente con la batimetría medida real de la que se dispone para así validar la metodología, y tampoco obtener datos reales sobre la evolución morfológica de la playa. Además, se dispone de dos cámaras, mediante las cuales se logra abarcar toda la playa, ya que con solo una de ellas no se dispone de información sobre todo el área de estudio.

Para ello es necesario llevar a cabo una rectificación de los datos, para así obtenerlos en coordenadas x , y , z . Partiendo de las coordenadas de la imagen (2D) se obtiene una imagen con las coordenadas del mundo real (3D), proyectada en una cota Z definida. Los resultados obtenidos mediante este proceso, son métricos y son los que se utilizarán para llevar a cabo el

solape de ambas cámaras, validar la metodología y llevar a cabo el análisis de la evolución morfológica de la Playa de la Magdalena.

3.3. VALIDACIÓN DE LA BATIMETRÍA

La validación de la batimetría se va a llevar a cabo comparando los resultados obtenidos mediante la metodología propuesta (teniendo en cuenta la reconstrucción de la batimetría) y la batimetría medida el 29 de septiembre de 2019.

La comparación se llevará a cabo mediante el uso conjunto de los datos proporcionados por ambas cámaras, pero se distinguirá entre la batimetría intermareal y la batimetría submareal.

Así, se comparará por un lado las batimetrías intermareales de ambas cámaras con los datos reales, para obtener el error cometido en dicha zona, y, por otro lado, las batimetrías submareales de ambas cámaras, obteniendo así el error de dicha zona.

Finalmente, se llevará a cabo la comparación de la batimetría completa, para conocer la validez del método al completo.

3.4. ESTUDIO DE EVOLUCIÓN DE LA PLAYA DE LA MAGDALENA

Una vez se dispone de las herramientas necesarias para la obtención tanto de la batimetría intermareal como de la batimetría submareal del día requerido de la Playa de la Magdalena, se dispone de una batimetría representativa de dicho día.

Para poder llevar a cabo un estudio de la evolución morfológica de la playa es necesario disponer de datos a lo largo de un periodo de tiempo, ya puede ser un periodo amplio de tiempo donde interesa ver cuál es la tendencia (largo plazo, meses-años) o corto de tiempo (corto plazo, horas-días) donde interesa ver la evolución frente a un temporal, esto depende de los procesos que se deseen analizar. En el presente estudio se analizará solamente el largo plazo, para poder analizar cuál es la tendencia de la playa.

3.4.1. LARGO PLAZO

Para analizar la evolución morfológica de una playa a largo plazo, en el presente estudio se va a llevar a cabo un análisis estacional, es decir, describir la evolución de la playa entre una estación y otra.

Para ello, se han obtenido una serie de batimetrías de la Playa de la Magdalena, en el periodo entre los años 2018 y 2019. En total, considerando el alcance del presente estudio y el tiempo del que se dispone para realizar el mismo, se ha optado por obtener 6 batimetrías, a un intervalo aproximado de 4 meses entre ellas.

Cabe destacar que a la hora de seleccionar el día en el cual se va a construir la batimetría, es obligatorio disponer de imágenes capturadas mediante la estación de monitorización, y a su vez, datos del nivel del mar para dicha fecha.

La selección de los días se ha llevado a cabo siguiendo los siguientes criterios:

- Carrera de marea: La carrera de marea del día seleccionado ha de ser lo suficientemente grande para poder disponer de datos de la batimetría en un área extensa y poder describir los procesos correctamente.
- Calidad de las imágenes: Las imágenes del día seleccionado han de ser de buena calidad, es decir, las imágenes deben ser claras e iluminadas, para así maximizar la calidad de las batimetrías.

Disponiendo de las batimetrías en las distintas fechas, se va a llevar a cabo un análisis de la evolución de la línea de costa para las distintas fechas, en las distintas partes de la playa, para así ver el avance/retroceso de la misma. A su vez, se analizará la variación del volumen a lo largo de la playa, pudiendo identificar zonas de acreción y erosión comparando las batimetrías de las distintas fechas. Finalmente, disponiendo del volumen, se calcularán las tasas de transporte de sedimento a lo largo de la playa.

4. IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO BATIMÉTRICO EN LA PLAYA DE LA MAGDALENA

En el presente capítulo se van a implementar las metodologías propuestas en el capítulo anterior, es decir, la metodología de obtención de la batimetría, para obtener la batimetría de la Playa de la Magdalena. Esta playa está monitorizada por las cámaras 1 y 2 de la estación descrita en el apartado 2.3. La determinación de la batimetría se va a realizar a fecha del 29 de septiembre de 2019, ya que en esta fecha se cuenta con la batimetría medida descrita en el apartado 2.4. Por lo tanto, se podrá llevar a cabo una validación de los resultados obtenidos, y finalmente, se discutirán los resultados de ambas batimetrías, y se sacarán conclusiones de los resultados obtenidos.

4.1. IMPLEMENTACIÓN

La implementación de la metodología en la Playa de la Magdalena se va a llevar a cabo por un lado para obtener la batimetría intermareal mediante las técnicas descritas en el capítulo anterior y por otro lado para obtener la batimetría submareal mediante el modelo batimétrico desarrollado en el capítulo anterior. Todo esto, como se ha mencionado previamente a fecha del 29 de septiembre de 2019.

4.1.1. BATIMETRÍA INTERMAREAL

La batimetría intermareal de la Playa de la Magdalena ha de caracterizarse mediante el uso de dos cámaras, la cámara 1, la cual abarca la zona sur de la playa, siendo esta una zona amplia y la cámara 2, la cual abarca la parte norte de la playa, teniendo esta una menor extensión.

Las imágenes seleccionadas este día, se encuentran en el intervalo de tiempo comprendido entre las 10:09 y las 15:19 con imágenes cada 10 minutos, aunque se exceptuaron las imágenes de las 10:19 y 10:49 en el caso de la cámara 1, debido a su complejidad en términos de detección de la línea de costa.

Una vez seleccionadas las imágenes a las cuales se va a detectar la línea de costa el 29 de septiembre de 2019, primero se emparejaron las fechas de las imágenes con las fechas del nivel del mar (figura 20), y una vez detectadas las líneas de costa, se llevó a cabo el suavizado de las mismas, y disponiendo de las líneas de costa y del nivel del mar para cada imagen, se construyó la batimetría intermareal representativa del día seleccionado. Esta batimetría abarca una zona intermareal de una distancia vertical desde el punto más bajo hasta el punto más alto de alrededor de 4.5m.

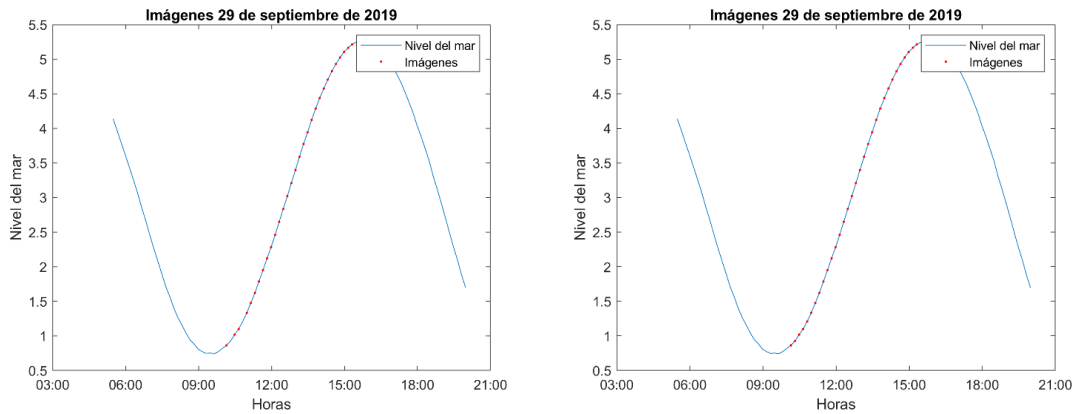


Figura 20: Emparejamiento de las fechas de las imágenes seleccionadas de la cámara 1 (izquierda) y cámara 2 (derecha) con sus correspondientes niveles de mar el 29 de septiembre de 2019.

En la figura 21 se muestra la batimetría intermareal del día analizado, se aprecia como las líneas de costa (líneas de color negro) se encuentran más cercanas horizontalmente en bajamar, y como esta distancia va aumentando a medida que se acercan a la pleamar. Esto da una idea sobre como la pendiente de la playa tiende a ser mayor en la zona baja de la playa, y esta pendiente es menor en la zona alta de la playa. Cabe destacar que las isobatas tienen un comportamiento recto y paralelo a la costa, las líneas de costa son regulares y la tridimensionalidad no es importante.

En las figuras 22 y 23 se corrobora lo mencionado en el párrafo anterior, ya que se puede apreciar la diferencia de pendiente en la zona alta y la zona baja de la playa, siendo mayor en la parte baja de la playa. Los huecos que se observan en las propias líneas de costa se deben al suavizado aplicado, es decir, al proceso de eliminación de elementos como sombrillas o personas, los cuales son elementos aleatorios.

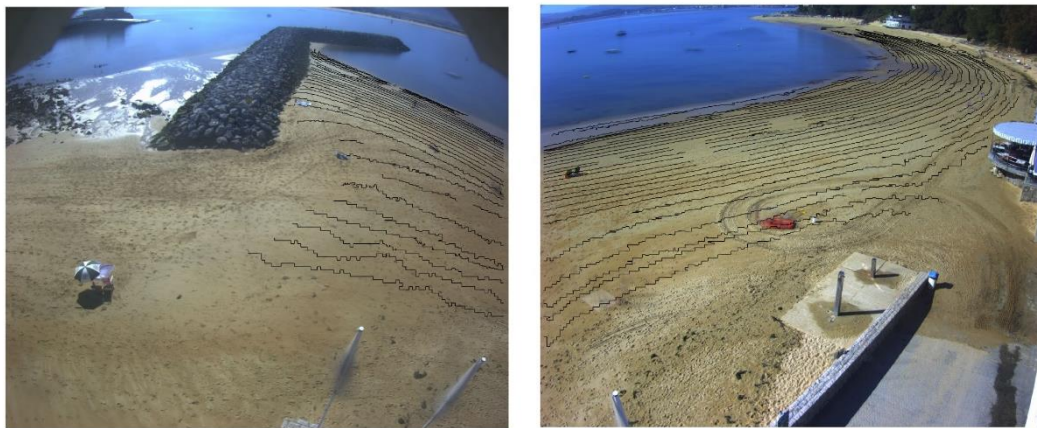


Figura 21: Batimetría intermareal (líneas negras) construida el 29 de septiembre de 2019 con la cámara 2 (izquierda) y la cámara 1 (derecha) en el instante correspondiente a la bajamar.

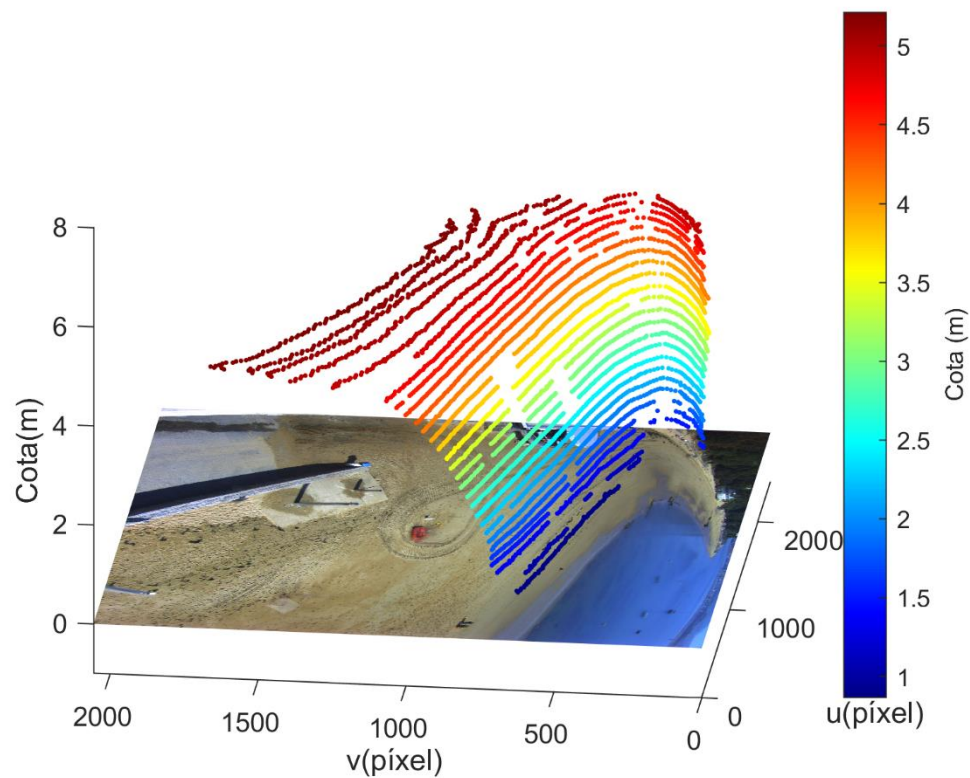


Figura 22: Batimetría intermareal 3D construida el 29 de septiembre de 2019 mediante la cámara 1 en coordenadas u , v y z .

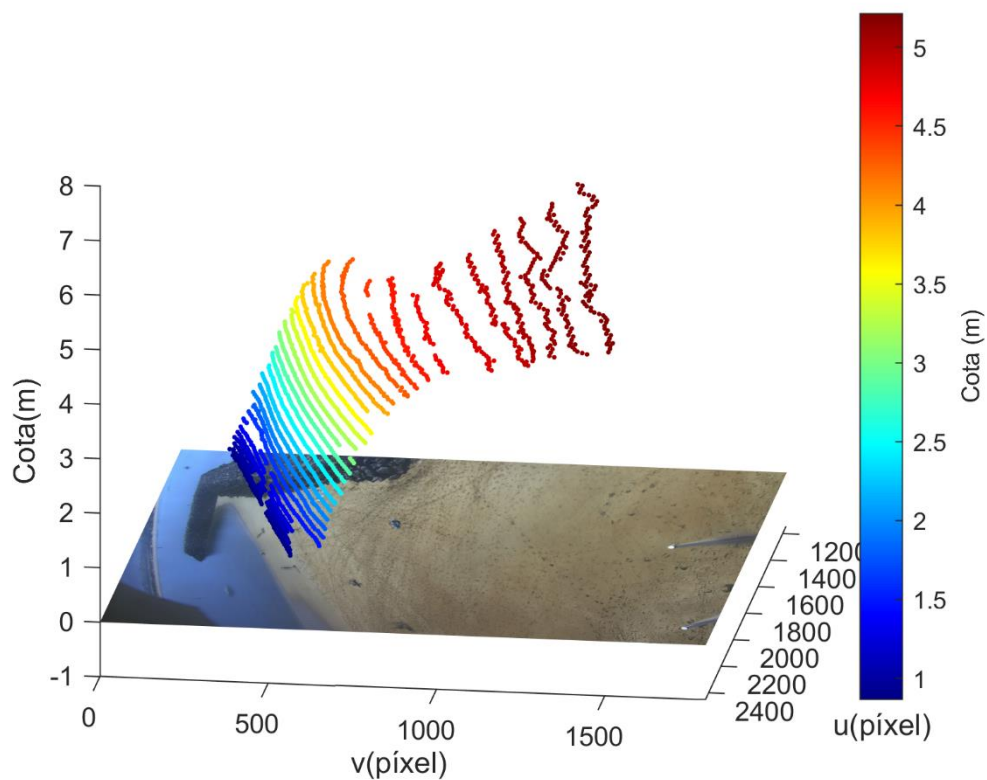


Figura 23: Batimetría intermareal 3D construida el 29 de septiembre de 2019 mediante la cámara 2 en coordenadas u , v y z .

4.1.2. BATIMETRÍA SUBMAREAL

Al igual que la batimetría intermareal, la batimetría submareal de la Playa de la Magdalena ha de caracterizarse mediante el uso de dos cámaras, la cámara 1 y la cámara 2.

En el presente apartado se van a mostrar los resultados de la batimetría submareal obtenidos para ambas cámaras mediante la metodología descrita en el capítulo anterior, y dentro de ellos, la calibración, la estimación y la validación de los parámetros del modelo.

4.1.2.1. CALIBRACIÓN DEL MODELO BATIMÉTRICO

El proceso de calibración del modelo batimétrico es el mismo para ambas cámaras, pero ha de hacerse por separado, ya que depende de las imágenes con las que se quiera calibrar el modelo.

Antes de comenzar a mostrar los resultados, es necesario mencionar ciertos apuntes.

Al comenzar a calibrar el modelo por primera vez, con los datos obtenidos a lo largo de toda la imagen de la cámara 1, se apreció como el error cuadrático medio del ajuste se veía influenciado con la lejanía de los datos tomando como referencia la posición de la cámara. Esto influye considerablemente en los contornos del modo espacial U_2 . Un ejemplo de esto se muestra en la figura 24, donde se observa como en la imagen derecha, en la parte izquierda de la imagen (la más cercana a la posición de la cámara, cuadrado verde), las líneas negras (contornos del modo espacial U_2 de valor constante), se asemejan a las líneas de costa de la batimetría intermareal (líneas coloridas) hasta cierta profundidad, donde dejan de asemejarse, la cual es una profundidad cercana a la profundidad límite que se definirá posteriormente. Por otro lado, a medida que se alejan de la cámara (parte derecha de la imagen, cuadrado rojo), estos contornos comienzan a distanciarse considerablemente de las líneas de costa detectadas. Por otro lado, en la cámara 2, la imagen izquierda, se aprecia como los contornos del segundo modo espacial y las líneas de costa de la batimetría intermareal se asemejan en la parte del mar cercana a la línea de costa (cuadrado verde).

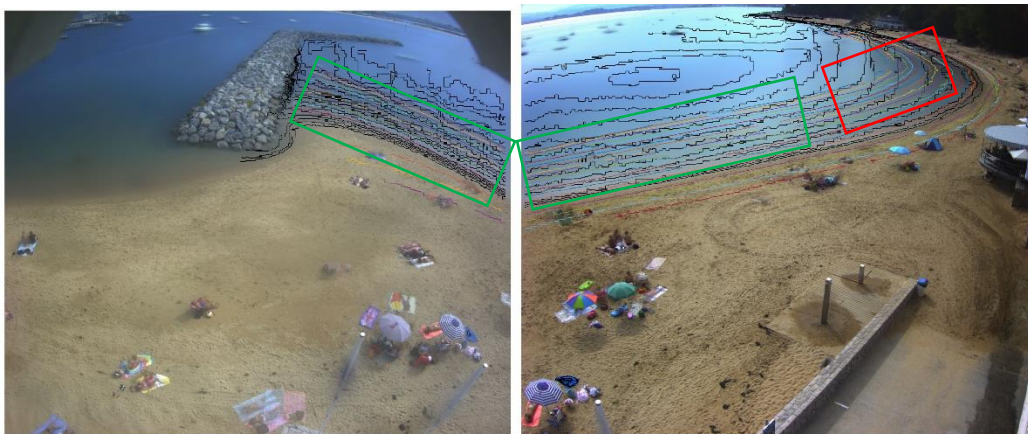


Figura 24: Ejemplo del comportamiento del modo espacial U_2 en negro, en distintos colores las líneas de costa obtenidas en la batimetría intermareal. A la izquierda cámara 2, a la derecha cámara 1. El cuadrado verde representa la zona donde los contornos de U_2 se asemejan a las líneas de costa, el cuadrado rojo, la zona donde comienzan a distanciarse.

Por lo tanto, para el presente estudio, se ha decidido tomar en cuenta solo una parte de la playa en el caso de la cámara 1, para que así los resultados no estén muy afectados por dicho factor,

pero sí ligeramente afectados, para así poder obtener las conclusiones pertinentes, mientras que en la cámara 2 se desarrollará toda la imagen.

El segundo punto a abordar se basa en la comparación de los dos métodos propuestos en la metodología, el cual se irá comentando en los resultados mostrados a continuación. Se van a mostrar los resultados obtenidos mediante el método 2, ya que ha sido el método seleccionado para llevar a cabo el estudio.

Mediante el procedimiento descrito en el apartado de metodología, y utilizando las ecuaciones:

$$Z_m = \alpha * U_2 + \beta * I_g + Z_0$$

$$Z = Z_m + E$$

donde,

Z_m : Profundidad obtenida mediante el modelo batimétrico.

Z : Profundidad obtenida de la batimetría intermareal.

Se obtiene para cada imagen, un valor de los parámetros α , β y Z_0 y un error para cada profundidad de calibrado tomada (h').

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, el ajuste se llevará a cabo para cada imagen. En cada una de ellas se irá disminuyendo la profundidad seleccionada para encontrar los parámetros óptimos relacionados con h' .

Un ejemplo de la profundidad límite escogida se muestra en la figura 25, donde se representa el ajuste en la imagen de la pleamar correspondiente a cada cámara. Se aprecia como cuanto mayor profundidad se trate de ajustar, mayor será el error cuadrático medio obtenido entre el resultado del modelo batimétrico y el valor de referencia. En dicha imagen se ha tomado un valor de profundidad límite de 1.43 metros para la cámara 1 y de 1.117m para la cámara 2, los cuales están marcados en rojo en la figura. Se ha optado por ajustar hasta dicha profundidad debido a que se observa como la curva del error disminuye su pendiente, representando que en profundidades menores a la escogida el valor del error cuadrático medio disminuye poco. En el caso representado el error cuadrático medio es de 0.102m en la cámara 1 y 0.063m en la cámara 2.

Por lo tanto, una vez fijada la profundidad límite en la imagen, se toman los parámetros correspondientes de α , β y Z_0 con los que se ha calculado el error previamente mencionado. Estos parámetros se muestran en las figuras 26, 27 y 28, donde se aprecia como el parámetro α tiene un comportamiento descendente junto a la profundidad en ambas cámaras, aunque con valores distintos, y los parámetros β y Z_0 no tienen un comportamiento claro en función de la profundidad y disponen de tendencias distintas en ambas cámaras. Cabe destacar que el comportamiento de los parámetros en cada imagen no ha de ser igual, aun siendo de la misma cámara. Es por esto que el proceso se lleva a cabo en todas las imágenes. Los valores de los parámetros para las cámaras 1 y 2 son de 2193.91, -0.17 y 0.58, y 1468.88, 0.23 y -0.32 respectivamente.

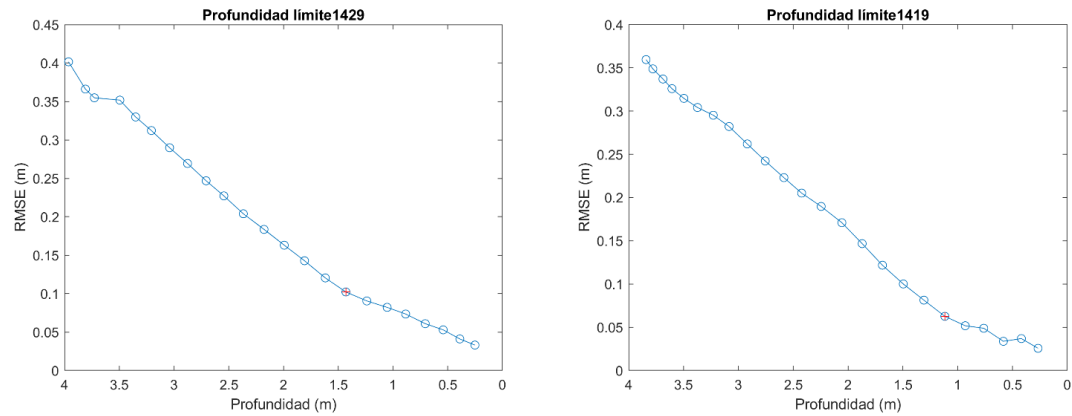


Figura 25: Gráfico representativo de la comparación entre profundidad y error cuadrático medio del ajuste en la imagen correspondiente a la pleamar, 29 de septiembre de 2019 a las 14:29, cámara 1 a la izquierda y a las 14:19, cámara 2 a la derecha. Los puntos azules representan el error cuadrático medio para cada profundidad ajustada, y el punto rojo la profundidad límite seleccionada.

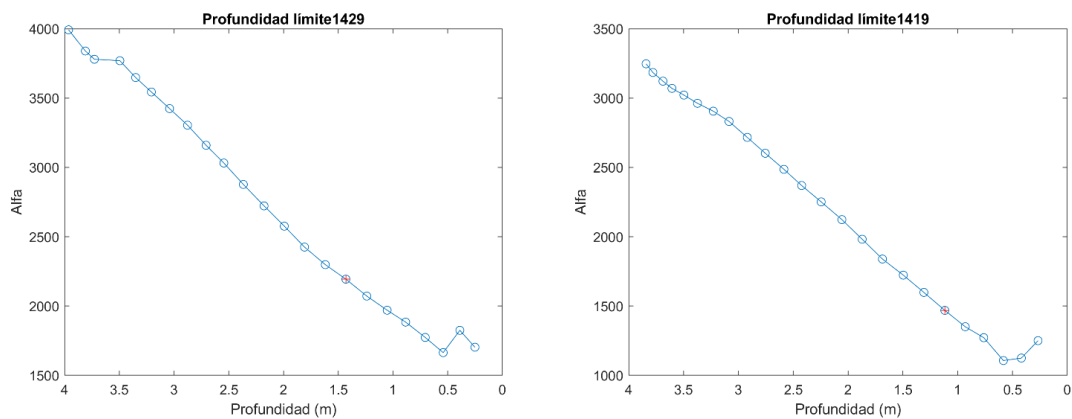


Figura 26: Gráfico representativo de la comparación entre profundidad y parámetro α del ajuste en la imagen correspondiente a la pleamar, 29 de septiembre de 2019 a las 14:29, cámara 1 a la izquierda y a las 14:19, cámara 2 a la derecha. Los puntos azules representan el valor del parámetro α para cada profundidad ajustada, y el punto rojo la profundidad límite seleccionada.

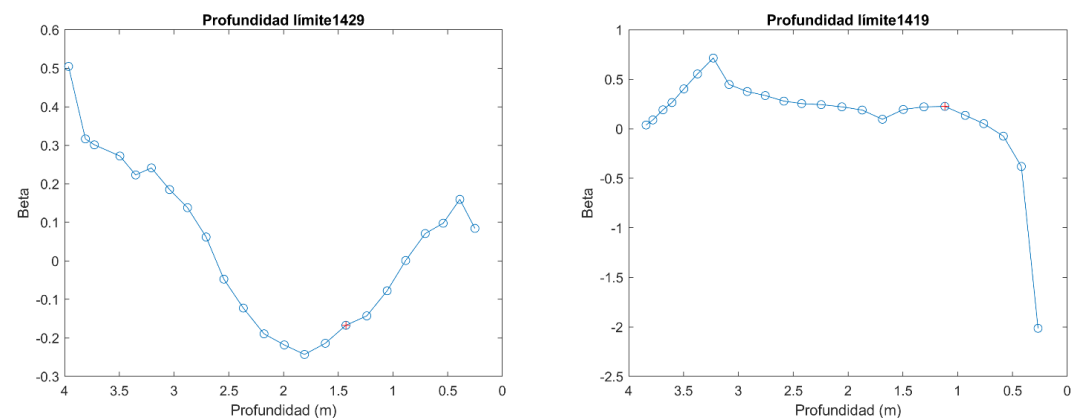


Figura 27: Gráfico representativo de la comparación entre profundidad y parámetro β del ajuste en la imagen correspondiente a la pleamar, 29 de septiembre de 2019 a las 14:29, cámara 1 a la izquierda y a las 14:19, cámara 2 a la derecha. Los puntos azules representan el valor del parámetro β para cada profundidad ajustada, y el punto rojo la profundidad límite seleccionada.

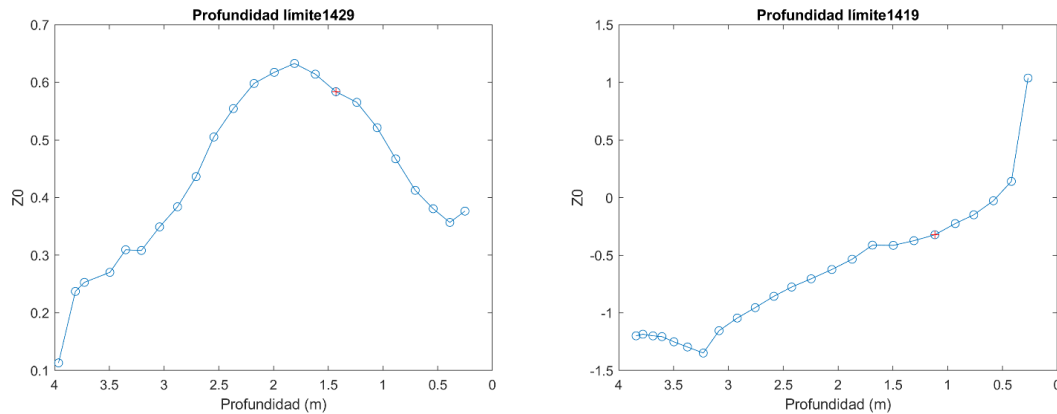


Figura 28: Gráfico representativo de la comparación entre profundidad y parámetro Z_0 del ajuste en la imagen correspondiente a la pleamar, 29 de septiembre de 2019 a las 14:29, cámara 1 a la izquierda y a las 14:19, cámara 2 a la derecha. Los puntos azules representan el valor del parámetro Z_0 para cada profundidad ajustada, y el punto rojo la profundidad límite seleccionada.

Para demostrar que el método 2 ha llevado a una mejora de los resultados respecto al primer método, en la figura 29, se muestra un ejemplo de la comparativa del ajuste de parámetros en la imagen correspondiente a las 13:19 y a las 14:19, para la cámara 2 (arriba) y la cámara 1 (abajo). Cabe destacar que la imagen correspondiente a las 14:19 dispone de un nivel del mar asociado mayor que la correspondiente a las 13:19, debido a que en el periodo de estudio el nivel del mar está en su tramo ascendente. La línea y puntos azules representan el método 2, y la línea y puntos verdes el método 1. Se observa como mediante el método 2 se disminuye el error cuadrático medio considerablemente en el caso de las imágenes correspondientes a las 13:19, mientras que para la imagen correspondiente a las 14:19 no se aprecian cambios. Esto indica que la iluminación contribuye más en las imágenes asociadas a una hora más temprana, debido a los efectos de la luz, que en este caso son las que disponen de un nivel del mar más bajo. Es por esto que el término de iluminación mejora los resultados el 100% de las veces, aunque solamente se den mejoras notorias el 25% de las veces, siendo una mejora de 0.05m en el error, mientras que el valor medio es de 0.02m.

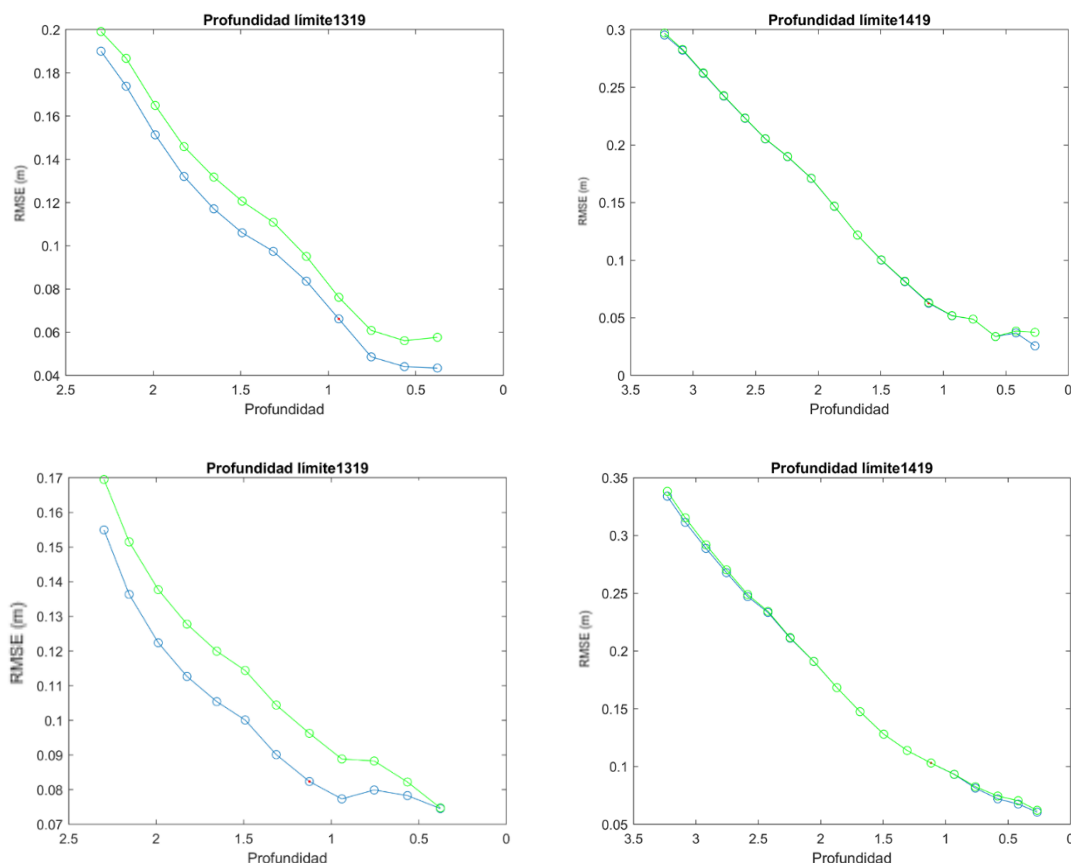


Figura 29: Gráfico representativo de la comparación entre profundidad y error cuadrático medio del ajuste en la imagen correspondiente al 29 de septiembre de 2019 a las 13:19 y a las 14:19, cámara 1 (abajo izquierda y derecha respectivamente) y cámara 2 (arriba izquierda y derecha respectivamente). Los puntos azules representan el error cuadrático medio para cada profundidad ajustada mediante el método 2, los puntos verdes el método 1 y el punto rojo la profundidad límite seleccionada.

Como se ha podido observar, se ha nombrado a la imagen correspondiente a las 14:29 como imagen de pleamar en la cámara 1 y la imagen correspondiente a las 14:19 como la imagen de la pleamar en la cámara 2, mientras que, en el apartado anterior, donde se describía la detección de la línea de costa en la batimetría intermareal, el nivel máximo de mar se alcanzaba a las 15:19 en ambas cámaras. Para la calibración del modelo batimétrico, y por lo tanto para la obtención de la batimetría submareal, se ha decidido no utilizar las imágenes en el margen entre las 14:39 y 15:19, ambas incluidas, para la cámara 1 y las imágenes en el margen entre las 14:29 y 15:19, ambas incluidas, para la cámara 2, debido a la gran influencia de la luz en las imágenes, las cuales solamente podían meter “ruido” a la calibración. Además, como se mostrará a continuación, se disponen de suficientes datos para llevar a cabo la calibración, sin la necesidad de estos últimos.

Una vez mostrado un ejemplo de la selección de la profundidad límite para la imagen de pleamar, se aplicó el mismo procedimiento a las demás imágenes de ambas cámaras, derivando en los resultados mostrados en las tablas 1 y 2 correspondientes a las cámaras 1 y 2 respectivamente. En las tablas se muestra la hora y nivel del mar correspondiente a cada imagen, los parámetros α , β y Z_0 , la profundidad límite, el error cuadrático medio y el porcentaje de profundidad adoptado en cada una de ellas respecto al máximo posible.

Tabla 1: Valores de los parámetros α , β y Z_0 , y el error obtenido para cada profundidad ajustada en cada imagen, para la cámara 1.

Hora	$h'(m)$	Error (m)	alfa	beta	Z_0	%h	Nivel del mar (m)
1429	1.43	0.102	2193.91	-0.17	0.58	36.07	4.828
1419	1.308	0.114	2108.92	0.00	0.43	34.04	4.706
1409	1.179	0.070	2269.28	-0.19	0.51	31.75	4.577
1359	1.229	0.073	2424.94	-0.30	0.55	34.38	4.439
1349	1.077	0.071	2537.58	-0.64	0.63	31.46	4.287
1339	1.103	0.082	2422.99	-1.16	0.61	33.84	4.123
1329	1.109	0.096	2681.32	-0.49	0.16	36.01	3.944
1319	1.125	0.082	2973.30	-0.94	0.40	38.65	3.775
1309	1.128	0.079	2964.13	0.01	-0.24	41.39	3.589
1259	1.277	0.171	2616.81	-1.22	0.44	50.39	3.398
1249	1.089	0.169	2135.73	-1.83	0.83	46.42	3.21
1239	1.233	0.072	3168.74	-1.41	0.25	57.19	3.02
1229	1.048	0.080	2723.93	-1.43	0.27	53.17	2.835
1219	1.029	0.125	1548.39	-3.22	1.30	57.61	2.65
1209	0.984	0.164	1202.85	-3.13	1.40	61.62	2.461
1159	1.183	0.182	267.83	-4.34	2.30	83.37	2.283
1149	1.021	0.151	-188.89	-4.33	2.41	81.23	2.121
1139	1.087	0.163	541.90	-4.84	2.30	100.00	1.951
1129	0.923	0.127	933.81	-3.69	1.59	100.00	1.787
1119	0.757	0.110	695.95	-3.75	1.64	100.00	1.621
1109	0.613	0.092	-263.27	-3.97	2.12	100.00	1.477
1059	0.469	0.043	-422.96	-2.06	1.43	100.00	1.333
1039	0.236	0.036	50.96	-2.43	1.20	100.00	1.1

Tabla 2: Valores de los parámetros α , β y Z_0 , y el error obtenido para cada profundidad ajustada en cada imagen, para la cámara 2.

Hora	$h'(m)$	Error (m)	alfa	beta	Z_0	%h	Nivel del mar (m)
1419	1.117	0.063	1468.88	0.23	-0.32	29.07	4.706
1409	1.179	0.069	1554.88	0.02	-0.37	31.75	4.577
1359	1.041	0.057	1479.22	-0.38	-0.19	29.12	4.439
1349	1.077	0.055	1610.81	-0.79	-0.21	31.46	4.287
1339	1.103	0.065	1570.34	-0.36	-0.48	33.84	4.123
1329	1.109	0.080	1784.13	-0.87	-0.53	36.01	3.944
1319	0.94	0.066	1718.66	-1.58	-0.02	32.29	3.775
1309	0.939	0.065	1840.97	-2.25	0.30	34.46	3.589
1259	1.115	0.067	1688.11	-7.19	3.04	44.00	3.398
1249	1.089	0.131	1859.47	-7.31	3.19	46.42	3.21
1239	1.069	0.107	1736.53	0.33	-1.58	49.58	3.02
1229	0.884	0.087	1328.31	-2.87	0.54	44.85	2.835
1219	1.029	0.109	1082.73	-3.07	0.88	57.61	2.65
1209	0.984	0.097	939.77	-3.53	1.28	61.62	2.461
1159	1.074	0.091	1096.11	-3.58	1.11	75.69	2.283
1149	1.021	0.076	947.17	-3.34	1.07	81.23	2.121
1139	1.025	0.087	933.32	-3.08	0.79	94.30	1.951
1129	0.578	0.067	618.58	-1.59	0.32	62.62	1.787
1119	0.603	0.059	828.80	-3.04	0.68	79.66	1.621
1109	0.551	0.055	584.25	-2.38	0.67	89.89	1.477
1059	0.469	0.043	539.71	-2.44	0.67	100.00	1.333
1049	0.345	0.049	320.09	-1.13	0.32	100.00	1.209
1039	0.236	0.032	424.17	-1.63	0.32	100.00	1.1
1029	0.154	0.020	159.66	-0.35	0.05	100.00	1.018

En ambas tablas se muestran todas las imágenes, excepto las dos últimas (recordar que se dispone de las líneas de costa en las imágenes correspondientes a las 10:29 y 10:09 en la cámara 1 y a las 10:19 y 10:09 en la cámara 2), debido a que estas dos últimas no se pueden ajustar, ya que como se ha mencionado en el capítulo 3, no se está teniendo en cuenta la línea de costa correspondiente a la imagen para el ajuste (debido a que es una línea de costa conocida), y además, el ajuste de la profundidad de una sola línea de costa no otorga resultados representativos para el modelo batimétrico.

Para complementar los resultados mostrados en las tablas 1 y 2, se van a mostrar esos mismos resultados mediante gráficas para ver claramente su evolución.

En la figura 30 se muestra la relación entre el parámetro de profundidad límite (h') respecto al nivel del mar correspondiente a cada imagen (en rojo), y la profundidad en la cual se dispone de datos para cada imagen o nivel del mar (en azul). Se aprecia como dicha profundidad límite se mantiene relativamente constante a lo largo de la serie en ambas cámaras, hasta que comienza a descender. Este descenso es debido a la falta de datos de batimetría intermareal (recordemos que está siendo utilizada como batimetría submareal para calibrar el modelo), ya que cuando la profundidad límite comienza a ser inferior a un metro es debido a que se está tomando la profundidad máxima disponible de datos, como muestra la línea azul, de la batimetría intermareal para ajustar el modelo, y esta no alcanza el metro.

Es por ello que, se ha decidido calibrar el modelo hasta la imagen correspondiente al nivel del mar donde la profundidad límite comienza a descender debido a la falta de datos, puesto que hasta ese punto esta se mantiene constante.

En la figura 31, se muestra la comparativa entre el error cuadrático medio obtenido del ajuste y el nivel del mar correspondiente, donde se aprecia como se dispone de un error medio de alrededor de 0.1m para la cámara 1 y 0.07m para la cámara 2. Estos errores corroboran la mejora obtenida mediante la aplicación del método 2.

En las figuras 32, 33 y 34, se muestra la evolución de los parámetros α , β y Z_0 respecto al nivel del mar (recordar que corresponde a cada imagen), donde el primero muestra una tendencia ligeramente ascendente partiendo desde pleamar, y esta desciende bruscamente a partir de cierto punto, por lo que la tendencia general es descendente desde pleamar hacia bajamar en ambas cámaras. El segundo parámetro muestra una clara tendencia descendente desde pleamar hasta bajamar, debida a la influencia del avance de las horas del día, ya que dispone de una tendencia ascendente desde las primeras horas del día (cuando el sol está saliendo) hasta el mediodía, nuevamente en ambas cámaras. Finalmente, el tercer parámetro muestra una tendencia ascendente desde pleamar hasta bajamar en ambas cámaras, por lo que el comportamiento de los parámetros en términos de tendencia es similar en ambas cámaras.

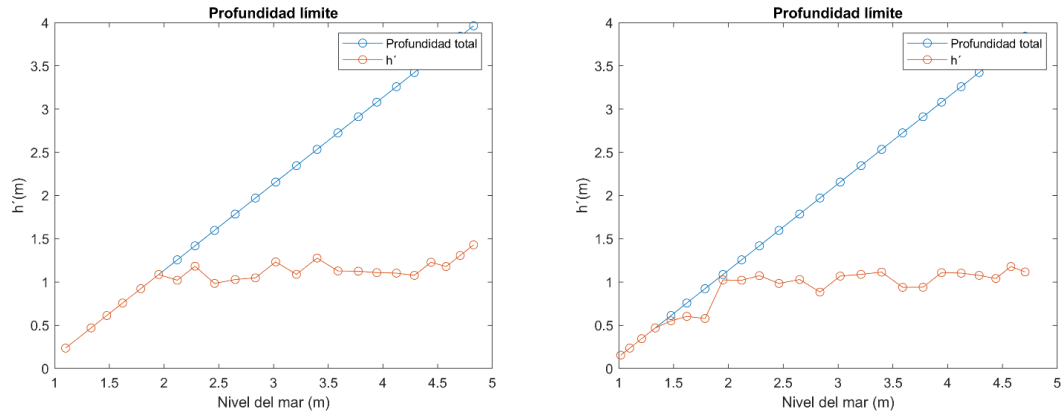


Figura 30: Profundidad límite seleccionada para cada imagen o nivel del mar en rojo, y profundidad total disponible en azul. Cámara 1 a la izquierda y cámara 2 a la derecha.

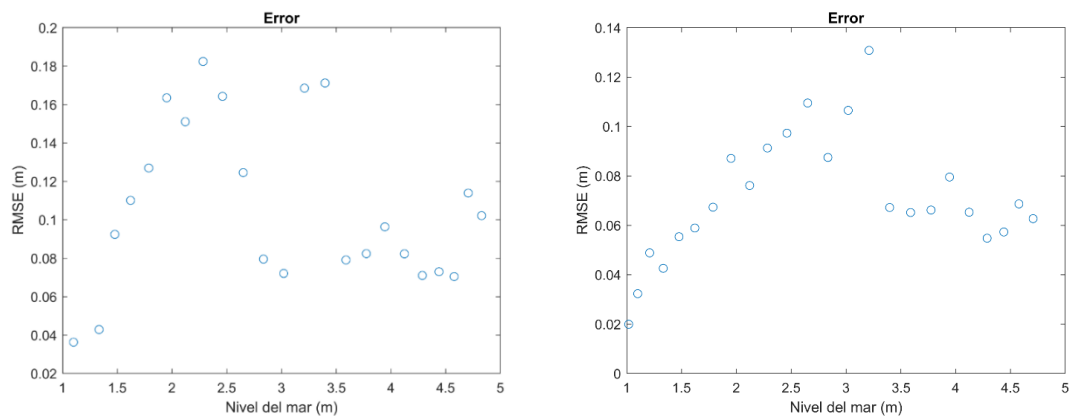


Figura 31: Error cuadrático medio de calibración en cada imagen o nivel del mar. Cámara 1 a la izquierda y cámara 2 a la derecha.

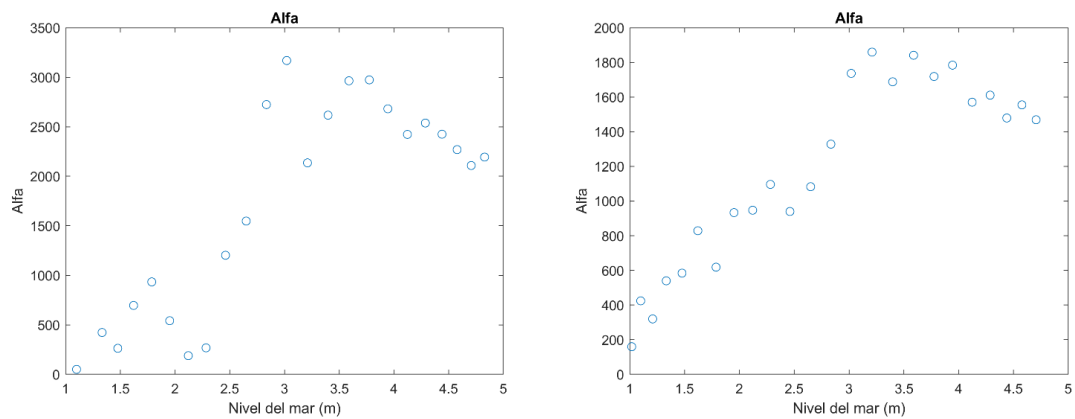


Figura 32: Parámetro α de calibración en cada imagen o nivel del mar. Cámara 1 a la izquierda y cámara 2 a la derecha.

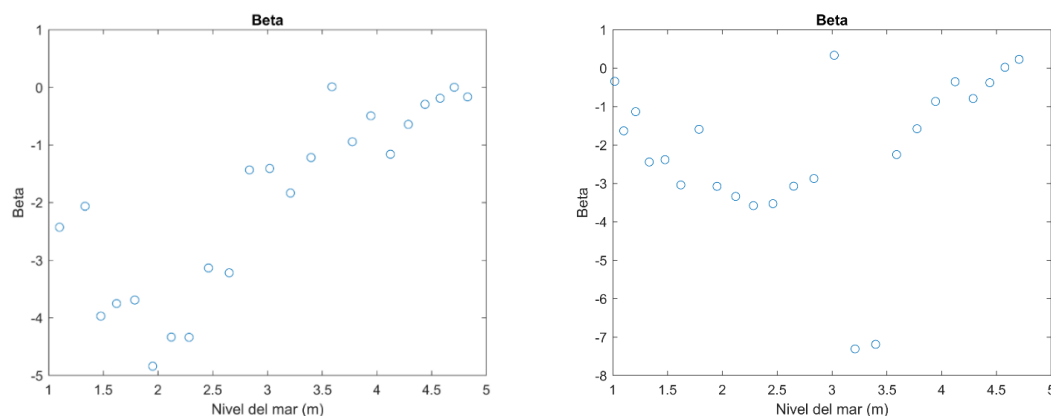


Figura 33: Parámetro β de calibración en cada imagen o nivel del mar. Cámara 1 a la izquierda y cámara 2 a la derecha.

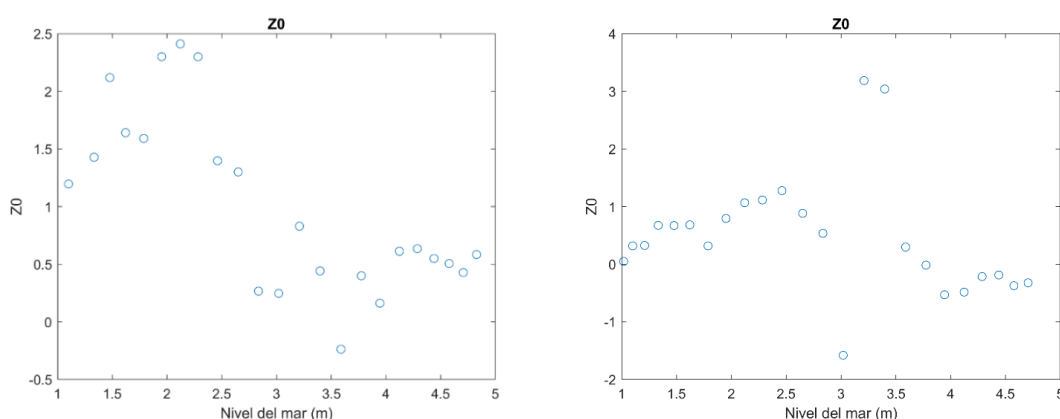


Figura 34: Parámetro Z_0 de calibración en cada imagen o nivel del mar. Cámara 1 a la izquierda y cámara 2 a la derecha.

4.1.2.2. ESTIMACIÓN DE LA BATIMETRÍA

Continuando con lo descrito en el apartado de calibración, donde se ha obtenido la evolución de los parámetros la serie de nivel del mar, es necesario fijar un límite para así distinguir los parámetros que se van a utilizar para calibrar el modelo y los parámetros que se van a utilizar para estimar la batimetría submareal.

Se ha podido observar en ambas cámaras como la profundidad límite con la que se ajustan los parámetros es similar en todas las imágenes, alrededor de 1.15m en la cámara 1 y alrededor de un metro en la cámara 2, hasta que comienza a decaer debido a que no se dispone de datos para ajustar mayores a dicha profundidad límite a partir de cierta imagen.

A continuación, se mostrará el límite seleccionado entre la calibración y la estimación para cada cámara, y como se han estimado los resultados en cada una de ellas.

La base de la estimación parte desde la representación de la figura 35, donde se muestra la evolución de la profundidad límite en cada imagen para ambas cámaras. Se ha seleccionado como límite de calibración la imagen asociada a la hora 11:39 en ambas cámaras, la cual se corresponde a un nivel del mar de 1.951m, este inclusive para la calibración.

Puesto que las profundidades límite para cada imagen son muy similares y casi constantes, se ha propuesto llevar a cabo la media de los valores seleccionados para la calibración, y esta se muestra como una línea negra en la figura 35, la cual dispone de un valor de 1.15m en el caso de la cámara 1, y 1.05m en la cámara 2.

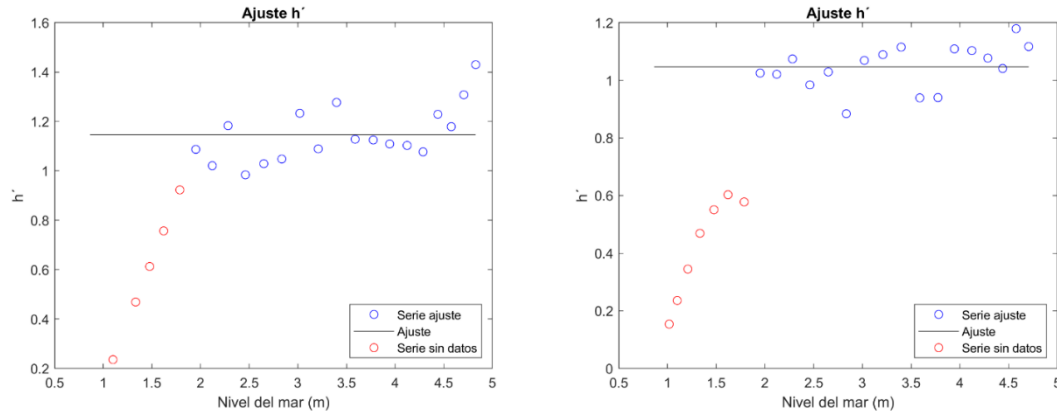


Figura 35: Profundidad límite seleccionada para cada imagen o nivel del mar, en azul los datos de calibración del modelo, en negro la media de los datos de calibración, y en rojo datos donde no se dispone de suficiente profundidad para ser utilizados como calibración, para la cámara 1 (izquierda) y la cámara 2 (derecha).

Por lo tanto, para las imágenes en las cuales no se dispone de datos mayores a la media de las profundidades límite de calibración (desde la imagen correspondiente a las 11:29, asociada a un nivel del mar de 1.787m, hacia abajo), se estimará la batimetría hasta la media de las profundidades límite de calibración desde el nivel del mar correspondiente a la imagen.

Es evidente que una parte de dicha estimación coincide con la zona donde se dispone de datos de la batimetría intermareal, y esto se mostrará en el siguiente apartado, en el cual se lleva a cabo la validación de dicha profundidad estimada de la batimetría submareal, comparándola con los datos de la batimetría intermareal. Pero a su vez se dispone de una estimación neta de la batimetría, en la zona donde no se dispone de datos.

Una vez mostrada la profundidad límite hasta la cual se va a estimar en cada imagen, se procede a calcular los valores de la batimetría en dicha zona.

Para ello, recordemos la ecuación descrita en el apartado de metodología:

$$Z_m(u, v) = \alpha * U_2(u, v) + \beta * I_g(u, v) + Z_0$$

Donde las matrices de U_2 e I_g están referidas a toda la imagen, con datos en cada píxel de la misma. Por lo tanto, el resultado es una matriz con las coordenadas de la imagen (u, v) , con datos de profundidad respecto al nivel del mar asociado a dicha imagen.

Los parámetros por definir para estimar la batimetría son α , β y Z_0 , en las imágenes donde no se dispone de datos.

En la figura 36 se muestra la evolución del parámetro α , donde los puntos azules representan los empleados para la calibración, y los rojos los cuales han quedado fuera de la misma, y por tanto en los que se pretende estimar la batimetría. Así, para simplificar el funcionamiento del modelo, y como se había mencionado en la metodología se les aplica una regresión lineal a los datos de calibración, para obtener valores de α donde los que se disponen no son válidos. La pendiente de la regresión lineal es descendente desde la imagen de pleamar hasta la imagen de

bajamar, tomando valores positivos de α . Por lo tanto, se utilizará el valor de α correspondiente al nivel del mar de cada imagen. La tendencia en ambas cámaras es similar, aunque en la cámara 1 existe un mayor rango de valores.

La figura 37 representa la evolución del parámetro β , donde los puntos azules representan los empleados para la calibración, y los rojos los que han quedado fuera de la misma. Mediante la regresión lineal aplicada a los valores de calibración, mostrada mediante una línea negra, se obtienen valores de β donde los que se disponen no son válidos. La pendiente es descendente desde la imagen de pleamar hasta la imagen de bajamar tomando valores negativos de β . Cabe destacar que, en bajamar, es decir, las primeras horas de la mañana, el coeficiente β adopta valores lejanos a 0, mientras que cuando se va acercando el mediodía en los valores de pleamar, esta se va tornando 0, lo que implica la poca influencia de dicho parámetro en dichas horas del día. Por lo tanto, se utilizará el valor de β correspondiente al nivel del mar de cada imagen en la que se pretende estimar la batimetría submareal. Queda claro que en ambas cámaras se dispone de una tendencia similar de los valores de dicho parámetro, además de mostrar valores similares, ya que, aun siendo cámaras distintas, las imágenes son del mismo día.

En la figura 38 se observa la evolución del parámetro Z_0 , donde las características descritas para las dos figuras anteriores son semejantes. Se ha aplicado nuevamente una regresión lineal a los datos de calibración, y en el caso de este parámetro, la pendiente es ascendente desde la imagen de pleamar hasta la imagen bajamar. Este parámetro está directamente relacionado con el valor de U_2 que adopta la línea de costa a la hora de detectarla (recordemos que dicho valor no es siempre 0). Se aprecia como para las imágenes en las que se va a estimar la batimetría adopta valores altos. Por lo tanto, se utilizará el valor de Z_0 correspondiente al nivel del mar de cada imagen. Nuevamente, tanto la tendencia como los valores de calibración de dicho parámetro son muy similares en ambas cámaras.

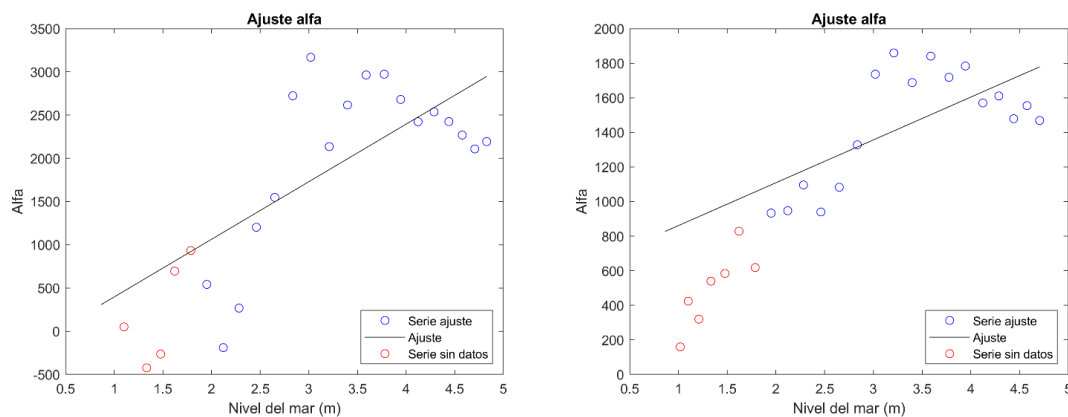


Figura 36: Parámetro α de calibración en cada imagen o nivel del mar, en azul los datos de calibración del modelo, en negro regresión lineal de los datos de calibración, y en rojo datos donde no se dispone de suficiente profundidad para ser utilizados como calibración, para la cámara 1 (izquierda) y la cámara 2 (derecha).

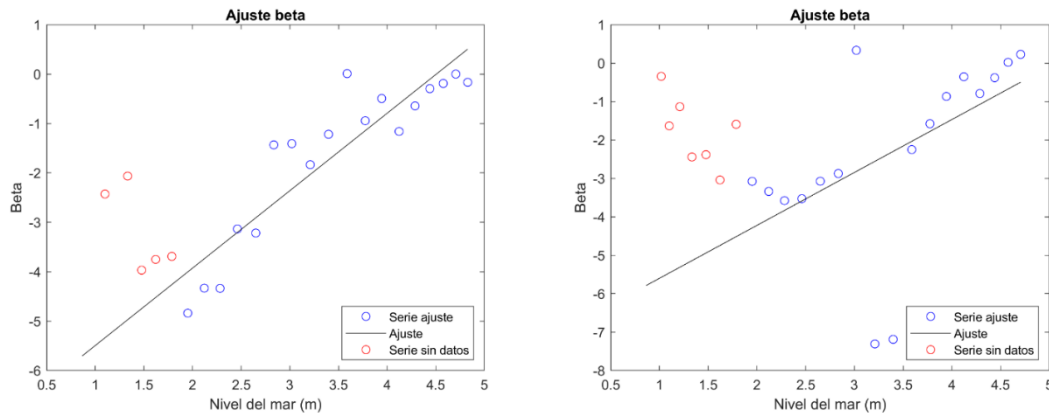


Figura 37: Parámetro β de calibración en cada imagen o nivel del mar, en azul los datos de calibración del modelo, en negro regresión lineal de los datos de calibración, y en rojo datos donde no se dispone de suficiente profundidad para ser utilizados como calibración, para la cámara 1 (izquierda) y la cámara 2 (derecha).

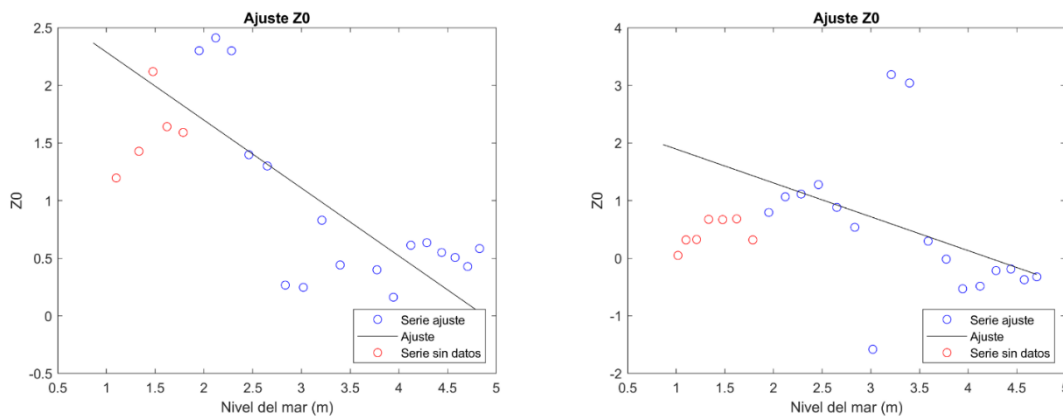


Figura 38: Parámetro Z_0 de calibración en cada imagen o nivel del mar, en azul los datos de calibración del modelo, en negro regresión lineal de los datos de calibración, y en rojo datos donde no se dispone de suficiente profundidad para ser utilizados como calibración, para la cámara 1 (izquierda) y la cámara 2 (derecha).

Se dispone ya de los parámetros necesarios para llevar a cabo la estimación de la batimetría submareal en cada una de las imágenes.

Los resultados obtenidos de la ecuación previamente descrita son profundidades respecto al nivel del mar correspondiente a la imagen en la que se está estimando la batimetría, y se dispone de los resultados para toda la imagen en la zona sumergida por el agua. Por lo tanto, se dispone de datos en cada píxel sumergido en agua de la imagen (coordenadas espaciales u y v), por lo que es necesario aplicar un filtro para centrar la zona de interés. Además de esto, se procederá a eliminar las zonas de estimación que se vean influenciadas por aleatoriedades, es decir, personas caminando por dicha zona, barcos... ya que son elementos que no se pueden controlar y por lo tanto aleatorios.

Los resultados se pueden representar de dos maneras, como profundidad respecto al nivel del mar en cada imagen, o como datos de batimetría referenciados respecto al 0 del Puerto de Santander.

A continuación, se mostrarán las estimaciones de la batimetría llevadas a cabo para las distintas imágenes en las cuales no se dispone de datos más abajo que el nivel del mar menos la

profundidad límite, cabe destacar que se mostrarán las estimaciones totales, es decir, la batimetría desde la posición del nivel del mar hasta la profundidad límite respecto al mismo nivel del mar, y la zona común con los datos de batimetría intermareal se mostrará en el siguiente apartado de validación.

Las figuras que se describirán a continuación son de dos tipos, a la izquierda se muestra la batimetría en 2D, donde los colores representan la cota de la batimetría referida al 0 del Puerto de Santander. A la derecha, se muestra la batimetría en 3D, donde los colores representan la profundidad respecto al nivel del mar correspondiente a cada imagen.

En este apartado solamente se va a mostrar la estimación neta de la batimetría, es decir, la estimación llevada a cabo en la imagen correspondiente a la bajamar, ya que es en la que se dispone de más datos “nuevos”. En caso de querer observar las demás estimaciones de la batimetría, estas se encuentran en el Anexo II.

La figura 39 representa la estimación de la batimetría en la imagen de bajamar de la cámara 1, la cual se corresponde a las 10:09 del 29 de septiembre de 2019. Es una estimación neta de 1.15m de profundidad, en la cual se aprecia una gran pendiente. A su vez, se presenta como una batimetría recta y paralela a la costa, la cual coincide con la descripción llevada a cabo de la batimetría intermareal.

En la figura 40 se muestra la estimación de la batimetría llevada a cabo mediante el modelo batimétrico, para la imagen correspondiente a las 10:09 del 29 de septiembre de 2019, capturada mediante la cámara 2. Esta estimación llega hasta 1.05 metros de profundidad como se ha descrito previamente. En esta imagen se observa una pendiente mayor que la mostrada en la cámara 1, aunque sigue siendo una batimetría recta y paralela a la costa.

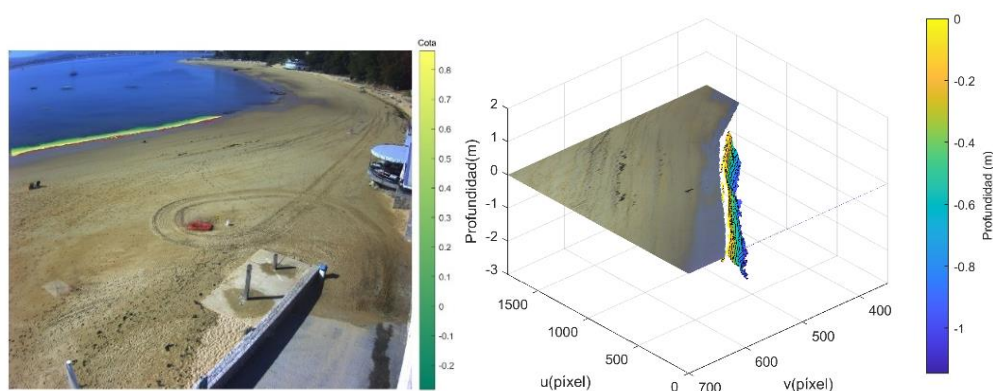


Figura 39: Estimación del modelo batimétrico en la imagen de la cámara 1 correspondiente a las 10:09 el 29 de septiembre de 2019, con un nivel del mar de 0.864m. A la izquierda imagen 2D con batimetría referida al 0 del Puerto de Santander, a la derecha imagen en 3D con batimetría referida al nivel del mar en dicha imagen.

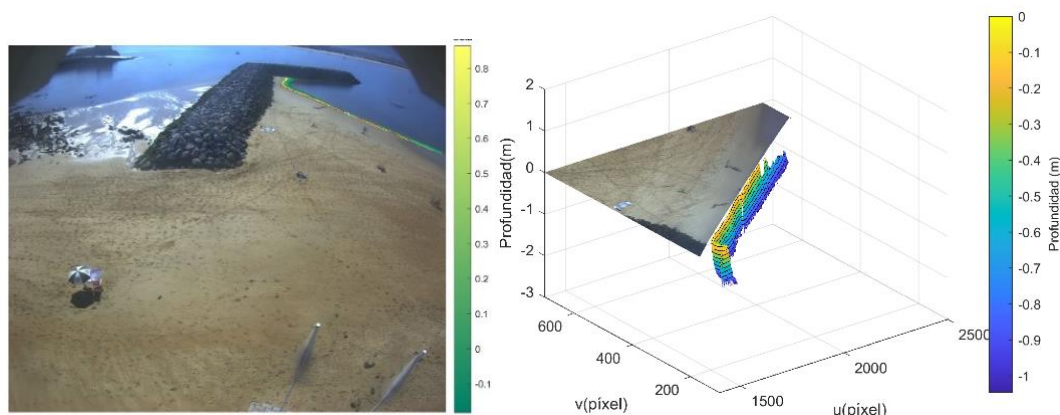


Figura 40: Estimación del modelo batimétrico en la imagen de la cámara 2 correspondiente a las 10:09 el 29 de septiembre de 2019, con un nivel del mar de 0.864m. A la izquierda imagen 2D con batimetría referida al 0 del Puerto de Santander, a la derecha imagen en 3D con batimetría referida al nivel del mar en dicha imagen.

Para demostrar la coherencia de los resultados obtenidos de la estimación de la batimetría, se van a mostrar unos ejemplos de la comparación entre las estimaciones de la batimetría llevadas a cabo en las imágenes más cercanas temporalmente (por ejemplo, 11:29 y 11:19), ya que como se ha explicado en el capítulo anterior, estas disponen de una zona común en la cual se están obteniendo resultados. Es importante destacar, que en los resultados que se van a mostrar, se están comparando las cotas referidas al 0 del Puerto de Santander. A continuación, se muestran unos ejemplos, los demás resultados se encuentran en el Anexo III.

En la figura 41, se muestra la comparativa entre las estimaciones correspondientes a los niveles de mar más altos para ambas cámaras. En el eje x se muestra la batimetría estimada correspondiente a las 11:29, mientras que en el eje y se muestra la correspondiente a las 11:19. En ambos casos se aprecia como la mayor densidad de datos se encuentra sobre la línea proporcional (línea negra diagonal del gráfico), y a su vez, poca dispersión de datos, aunque en la cámara 2 exista una mayor dispersión alrededor del metro. Los valores estadísticos obtenidos, presentan un error cuadrático medio bajo de 0.08m en la cámara 1 y 0.13m en la cámara 2, lo cual indica como en la cámara 2 existe una mayor dispersión de datos, un BIAS muy cercano a 0, lo cual indica que los resultados no se están sobreestimando, ni tampoco subestimando y una correlación muy alta, de 0.97 en el caso de la cámara 1 y 0.81 en el caso de la cámara 2, por lo que se concluye que el modelo es coherente en cuestión de resultados.

En la figura 42, se muestra la comparativa entre las estimaciones correspondientes a los niveles de mar más bajos para ambas cámaras. En el eje x se muestra la batimetría estimada correspondiente a las 10:29 en el caso de la cámara 1 (recordar que no se dispone de detección de línea de costa a las 10:19) y 10:19 en el caso de la cámara 2, mientras que en el eje y se corresponde con la batimetría estimada en la imagen de las 10:09. Se aprecia como hay una ligera mayor dispersión de los datos comparándola con la figura anterior, pero los resultados siguen mostrando coherencia, con errores cuadrático medio de 0.114m y 0.12m, BIAS muy cercanos a cero y una correlación alta de 0.94 y 0.89 para las cámaras 1 y 2 respectivamente. Por lo tanto, con lo descrito anteriormente y teniendo en cuenta que la mayor densidad de datos se encuentra sobre la línea proporcional, se demuestra que el modelo batimétrico es coherente.

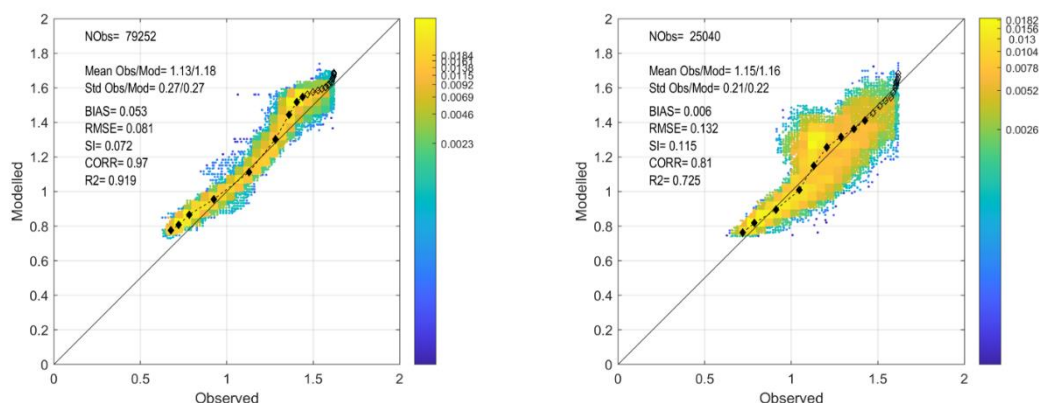


Figura 41: Gráfico de dispersión de probabilidad conjunta entre las batimetrías estimadas en las imágenes correspondientes a las 11:29 y 11:19, para la cámara 1 (izquierda) y la cámara 2 (derecha).

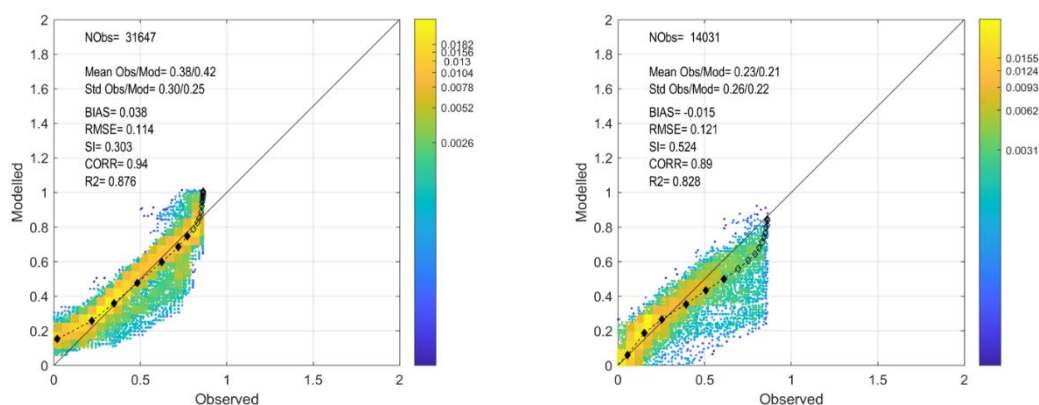


Figura 42: Gráfico de dispersión de probabilidad conjunta entre las batimetrías estimadas en las imágenes correspondientes a las 10:29 y 10:09, para la cámara 1 (izquierda). Gráfico de dispersión de probabilidad conjunta entre las batimetrías estimadas en las imágenes correspondientes a las 10:19 y 10:09, para la cámara 2 (derecha).

4.1.2.3. VALIDACIÓN DEL MODELO BATIMÉTRICO

En el presente apartado se muestra la validación de las estimaciones llevadas a cabo en el apartado anterior, ya que como se ha mencionado, existe una zona en de las estimaciones donde se dispone de datos sobre la batimetría, siendo esta la batimetría intermareal calculada en apartados anteriores, e interpolada a las dimensiones de la imagen.

Por lo tanto, mediante este proceso, se afirma que el modelo es auto validable, es decir, no necesita de datos medidos para validarse.

Las validaciones van a ser representadas mediante gráficos de dispersión ("scatter plots") de probabilidad conjunta, donde el eje x representa la profundidad medida (batimetría intermareal) y el eje y representa la profundidad estimada por el modelo. También se mostrarán las anomalías espaciales, la cual se basa en la resta entre la variable medida y la variable modelada en la imagen.

En este apartado, se muestran algunos ejemplos de las validaciones llevadas a cabo en la cámara 1 y en la cámara 2, las demás se encuentran en el Anexo IV.

En la figura 43 se muestra la comparativa entre la profundidad estimada en la imagen (eje y) de la cámara 1, correspondiente a las 11:29, y la profundidad correspondiente a los datos obtenidos de la batimetría intermareal (eje x), en la zona en la cual coinciden. En la imagen de la izquierda se muestra un gráfico de dispersión de probabilidad conjunta, donde se observa como los estadísticos (BIAS, RMSE, SI, CORR, R2), teniendo en cuenta los más relevantes, representan lo siguiente: el error cuadrático medio (RMSE) es de 0.165m, el BIAS es de 0.03m y la correlación es de 0.81. Aunque algunos datos están dispersos, como se observa visualmente en la figura y muestran los estadísticos, la mayor densidad de datos (color amarillo) se encuentra sobre la línea proporcional (línea diagonal de color negro), además de que los percentiles también se encuentran o sobre ella o muy cercanos a la misma. A la derecha, se observa el mapa de anomalías espaciales, donde se aprecia como la parte izquierda de la imagen es de color rojo, lo que representa la subestimación de la profundidad en los resultados obtenidos del modelo de alrededor de 0.1-0.2m, a su vez hay zonas blancas donde el modelo no dispone de error, y finalmente, la parte derecha de la imagen es de color azul, lo que representa sobreestimación de la profundidad por parte del modelo, la cual se encuentra entre 0.1-0.2m. Esto representa que en la parte izquierda se está sobreestimando la cota de la batimetría, y en la parte derecha se está subestimando la cota de la batimetría.

En la figura 44, se muestra la comparativa entre las profundidades obtenidas de la batimetría intermareal y las obtenidas de las estimaciones de la batimetría submareal en la cámara 1, en la imagen correspondiente a las 10:39, la cual es la última validación que se puede llevar a cabo, debido a que no se disponen de datos inferiores al nivel del mar correspondiente a dicha imagen. En la parte izquierda de la figura se encuentra el gráfico de dispersión de probabilidad conjunta, donde se aprecia como los estadísticos más representativos muestran que el error cuadrático medio es de 0.073m, el BIAS es de 0.01m, y la correlación es de 0.39, y la mayor densidad de datos se encuentra sobre la línea proporcional, al igual que los percentiles. El mapa de anomalías espaciales muestra cómo se sobreestima la profundidad en la parte derecha de la imagen, y se subestima en la parte izquierda de la misma. Cabe destacar que, los mapas de anomalías espaciales muestran una menor diferencia, mejorando los resultados, respecto a la figura anterior, debido a que, al descender el nivel del mar, se dispone de menos datos con los cuales comparar, y, por lo tanto, se compara una zona menor, ya que disminuye el área que se dispone de la batimetría intermareal.

Por otro lado, en la figura 45 se muestra la comparativa en la cámara 2, correspondiente a la imagen de las 11:29, la cual se ha definido como la imagen correspondiente al nivel del mar más alto en la cual se validan los resultados. En la imagen izquierda, se aprecia como las profundidades obtenidas mediante el modelo son mayores que las obtenidas de la batimetría intermareal, por lo que el modelo batimétrico está sobreestimando la profundidad de la batimetría. Esto también se aprecia en los valores estadísticos, específicamente en el BIAS, ya que este toma un valor de 0.141m, el cual es mayor que en los casos anteriores. Por otro lado, el error cuadrático medio es de 0.19m y la correlación es de 0.82. En la imagen derecha se observa como gran parte de la predicción es de color azul, lo cual representa a su vez, sobreestimación de la profundidad por parte del modelo batimétrico. Es importante destacar que se sobreestiman los resultados de profundidad, por lo que se está subestimando la cota real de la batimetría.

En la figura 46 se muestra como el modelo batimétrico sobreestima totalmente las profundidades en ambos ejemplos de la figura.

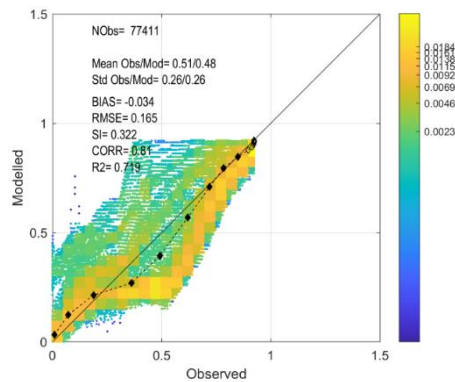


Figura 43: Comparación entre profundidad modelada y profundidad medida en la cámara 1, 11:29. A la izquierda gráfico de dispersión de probabilidad conjunta, a la derecha mapa de anomalías espaciales, donde el color rojo representa subestimación de la profundidad y el color azul sobreestimación de la profundidad por parte del modelo.

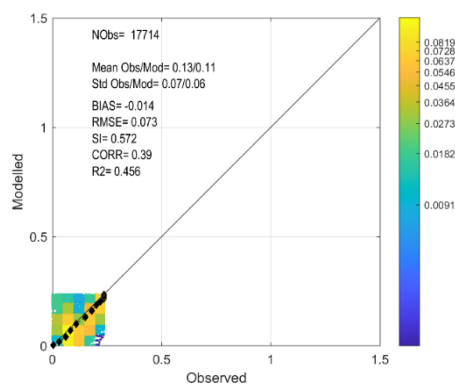


Figura 44: Comparación entre profundidad modelada y profundidad medida en la cámara 1, 10:39. A la izquierda gráfico de dispersión de probabilidad conjunta, a la derecha mapa de anomalías espaciales, donde el color rojo representa subestimación de la profundidad y el color azul sobreestimación de la profundidad por parte del modelo.

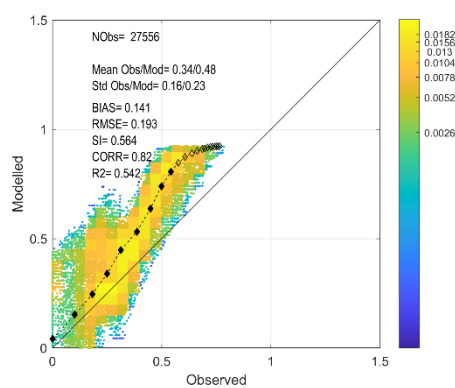


Figura 45: Comparación entre profundidad modelada y profundidad medida, 11:29. A la izquierda gráfico de dispersión de probabilidad conjunta, a la derecha mapa de anomalías espaciales, donde el color rojo representa subestimación de la profundidad y el color azul sobreestimación de la profundidad por parte del modelo.

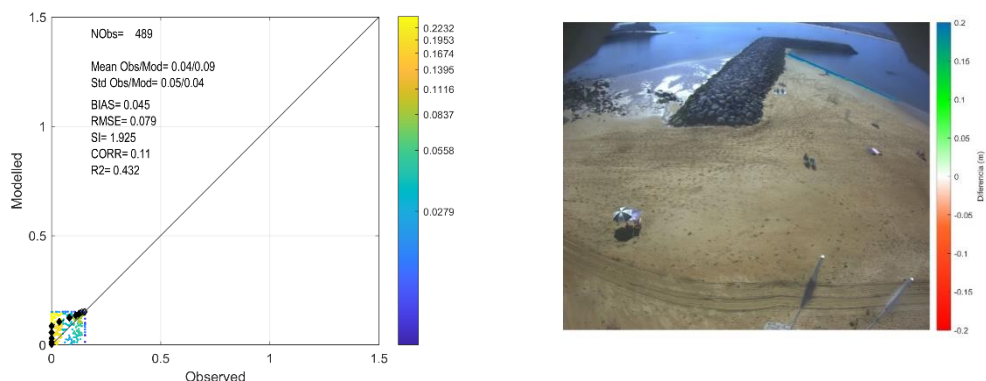


Figura 46: Comparación entre profundidad modelada y profundidad medida, 10:29. A la izquierda gráfico de dispersión de probabilidad conjunta, a la derecha mapa de anomalías espaciales, donde el color rojo representa subestimación de la profundidad y el color azul sobreestimación de la profundidad por parte del modelo.

4.1.3. RECONSTRUCCIÓN BATIMÉTRICA

Una vez se dispone tanto de la batimetría intermareal como la batimetría submareal de la Playa de la Magdalena el 29 de septiembre de 2019, se procede a representar conjuntamente ambas batimetrías en la imagen correspondiente a la bajamar. Cabe destacar que la batimetría submareal estimada es la correspondiente a dicha imagen. La batimetría intermareal queda representada mediante cotas, referidas al 0 del Puerto de Santander, mientras que la batimetría submareal queda representada respecto a la profundidad a la que se encuentra del nivel del mar en la imagen.

En la figura 47 se muestra la batimetría de la Playa de la Magdalena el 29 de septiembre de 2019, obtenida utilizando la cámara 1, donde la batimetría intermareal queda representada mediante puntos, y la batimetría submareal mediante una superficie. Mediante la barra de colores se muestran las cotas de la batimetría intermareal (positivo) y la profundidad respecto al nivel del mar de la batimetría submareal (negativo), y como se puede observar, la pendiente va aumentando en la zona baja de la playa, siendo mayor en la parte submareal de la misma. A su vez, se aprecia como la batimetría intermareal abarca toda la playa, mientras que de la batimetría submareal solamente se conoce una parte. Por lo tanto, se distinguen tres zonas en el perfil de playa, la zona alta de la playa, donde se encuentra una pequeña parte de la batimetría intermareal, con una pendiente pequeña, la zona media de la playa, donde se encuentra la mayor parte de la batimetría intermareal, con una pendiente mayor, y finalmente, la zona baja de la playa, donde se encuentra la batimetría submareal, la cual dispone de una pendiente mayor a las dos anteriores.

En la figura 48 queda representada la batimetría de la Playa de la Magdalena el 29 de septiembre de 2019, obtenida mediante la cámara 2. La batimetría intermareal está representada mediante puntos, mientras que la batimetría submareal mediante una superficie, y están referenciadas de la misma manera a la que se ha descrito en el párrafo anterior. Se distinguen tres zonas a lo largo del perfil de playa al igual que en la cámara 1, pero visto que no se han obtenido unos resultados idóneos en la validación del modelo batimétrico en la cámara 2, para analizar la evolución morfológica de la playa en el próximo capítulo se va a prescindir de la parte submareal en la batimetría obtenida mediante la cámara 2.

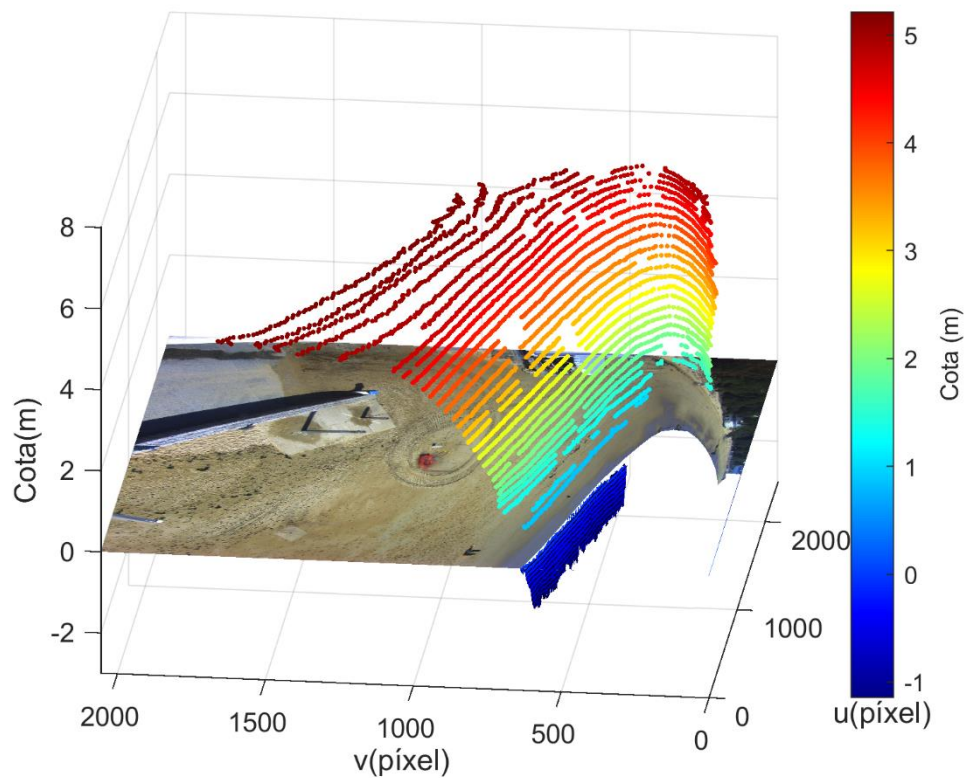


Figura 47: Batimetría de la Playa de la Magdalena el 29 de septiembre de 2019, cámara 1.

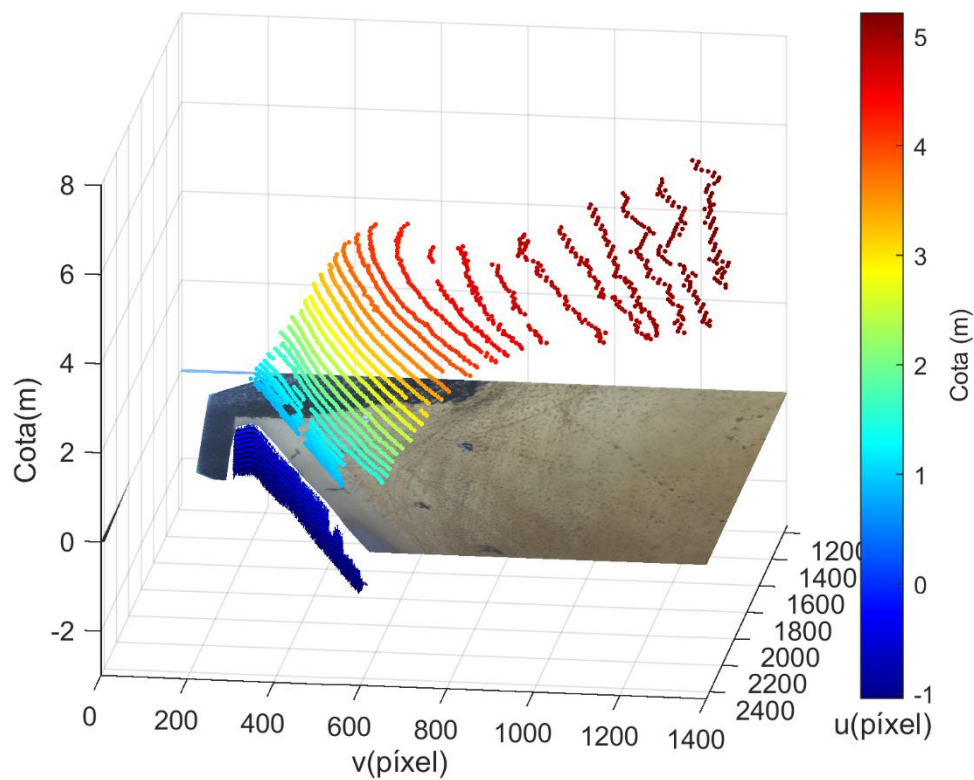


Figura 48: Batimetría de la Playa de la Magdalena el 29 de septiembre de 2019, cámara 2.

Por otro lado, mediante la rectificación de la batimetría, se ha obtenido las coordenadas x, y, z tanto de la batimetría intermareal como de la batimetría submareal, en ambas cámaras. Disponiendo de dichas coordenadas, se ha podido representar la batimetría de la Playa de la Magdalena al completo, referenciada respecto al 0 del Puerto de Santander, para el 29 de septiembre de 2019.

En la figura 49 se muestra la batimetría de la Playa de la Magdalena en coordenadas reales, encima de una imagen de la propia playa. Se observa como abarca desde alrededor de la cota +5 hasta alrededor de la cota 0. El solape entre ambas cámaras no es exacto, por lo que existe una zona en la cual no se disponen de datos entre la cámara 1 y la cámara 2. Por otro lado, la batimetría submareal se encuentra redondeada mediante un contorno negro, y se aprecia como la transición es suave en ambas cámaras, lo cual consolida el modelo, aunque se haya destacado que la batimetría submareal obtenida mediante la cámara 2 subestima la cota de la batimetría.

Es importante destacar, que además de que ambas cámaras no solapan, existe un desfase entre ambas. En la zona alta de la playa la batimetría cuadra relativamente bien entre ambas cámaras, pero a medida que se avanza a la zona baja de la playa, se aprecia como las cotas de batimetría similares (mismo color en la barra de colores) tienen un desfase que no se asemeja a la realidad. Analizando los resultados, se aprecia como la batimetría obtenida mediante la cámara 2 cuadra en longitud transversal con las dimensiones del primer dique (130m), por lo que se asume que existe un error en la rectificación llevada a cabo en la batimetría de la cámara 1. Este error ha de tenerse en cuenta a la hora de validar la batimetría obtenida mediante la metodología propuesta, en el siguiente apartado, y, además, para estudiar la evolución morfológica de la Playa de la Magdalena a largo plazo (capítulo 5). Es por esto que la validación de la batimetría se llevará a cabo distinguiendo ambas cámaras, y a su vez, el análisis de la evolución morfológica de la Playa de la Magdalena.

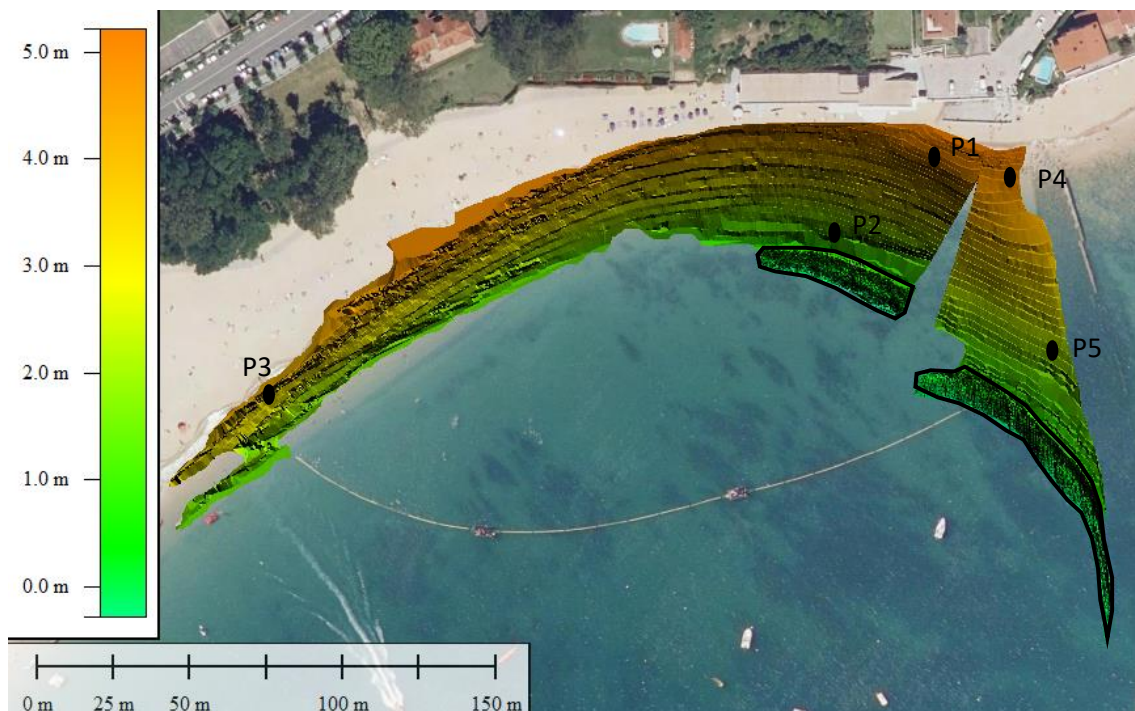


Figura 49: Batimetría de la Playa de la Magdalena del 29 de septiembre de 2019, referenciada en el 0 del Puerto de Santander. Los puntos 1, 2, 3, 4 y 5 hacen referencia al siguiente apartado.

4.2. VALIDACIÓN DE LA BATIMETRÍA

Una vez llevada a cabo la reconstrucción de la batimetría para el 29 de septiembre de 2019, es necesario validarla, comparándola con la batimetría medida ese mismo día, y como se ha mencionado en el apartado anterior, esta validación se llevará a cabo distinguiendo la batimetría obtenida mediante la cámara 1 y la cámara 2. A su vez, se llevará a cabo la validación de la batimetría intermareal por un lado y la batimetría submareal por otro.

Antes de comenzar con el análisis de los resultados, han de tenerse en cuenta un primer error derivado de la rectificación de los datos, y un problema que se ha tenido en la rectificación de los datos de la cámara 1.

El primer error, se basa en la distancia a la que se encuentran los puntos de las líneas de costa detectadas respecto a la cámara, y su ángulo. Esto se basa en que las imágenes oblicuas están distorsionadas, no representan magnitudes reales, y para explicarlo, se han convertido los píxeles en metros en las distintas partes de la playa. En la figura 49, en la zona capturada por la cámara 1, en el punto 1, la zona más cercana a la cámara, 1 píxel se atribuye a 0.01m, por lo que la precisión es muy buena. En el punto 2, un píxel se atribuye a 0.1m, la cual es una buena precisión. En el punto 3, la zona más alejada de la cámara, un píxel se atribuye a 2m, la cual es una precisión razonable. Respecto a la cámara 2, en el punto 4 se dispone de una precisión de 0.01m, mientras que en el punto 5, la precisión es de 0.1m. Por lo tanto, este error deriva en la dispersión de los datos, debido a que en la zona cercana el error será pequeño, mientras que, en la zona alejada, el error será mayor.

El problema mencionado, obtenido en la rectificación de los datos, está asociado a los puntos de control necesarios para llevar a cabo dicha rectificación, y se explica en el siguiente párrafo.

Para poder rectificar los datos obtenidos en la cámara 1, era necesaria una salida de campo a la Playa de la Magdalena, en la cual se obtendrían unos puntos de control para llevar a cabo dicho proceso. Esta salida de campo no se pudo llevar a cabo, por lo que la rectificación de los datos se llevó a cabo utilizando puntos de control no adecuados para llevar a cabo dicho proceso. Debido al mismo, la comparativa de los resultados en la cámara 1 se llevará a cabo cualitativamente.

Por este motivo, no se dispone de resultados cuantificados de las batimetrías obtenidas en la cámara 1, pero para demostrar la validez del método, se llevará a cabo un análisis cualitativo, mediante el cual se demuestra que con una rectificación adecuada de los datos, la metodología propuesta proporcionaría resultados adecuados.

En la figura 50 se muestra la batimetría medida de la Playa de la Magdalena, el 29 de septiembre de 2019, donde se aprecia como la batimetría es suave, recta, y paralela, sin cambios bruscos en su morfología, al igual que la mostrada en la figura 49. Por lo tanto, escogiendo un perfil en ella (línea amarilla), este perfil se puede tomar como representativo de toda la playa. En la figura 51 se aprecia el perfil mostrado en la figura anterior, donde se puede dividir la playa en tres zonas transversalmente. La primera, en azul, se corresponde a la parte alta de la playa, donde se aprecia una pendiente de alrededor de 0.05. La segunda, en negro, se corresponde a la zona media, la cual dispone de una pendiente mayor, de alrededor de 0.09. Finalmente, en rojo, queda representada la zona baja de la playa, la cual dispone de una pendiente de alrededor de 0.12, mayor a las anteriores. Esta descripción, cuadra correctamente con la llevada a cabo en la batimetría obtenida de las imágenes en 2D, donde la batimetría submareal, en la parte baja de

la playa presentaba una mayor pendiente, y la parte alta de la playa presentaba una pendiente menor, por lo que se puede concluir que cualitativamente, los resultados obtenidos en la cámara 1 son adecuados.

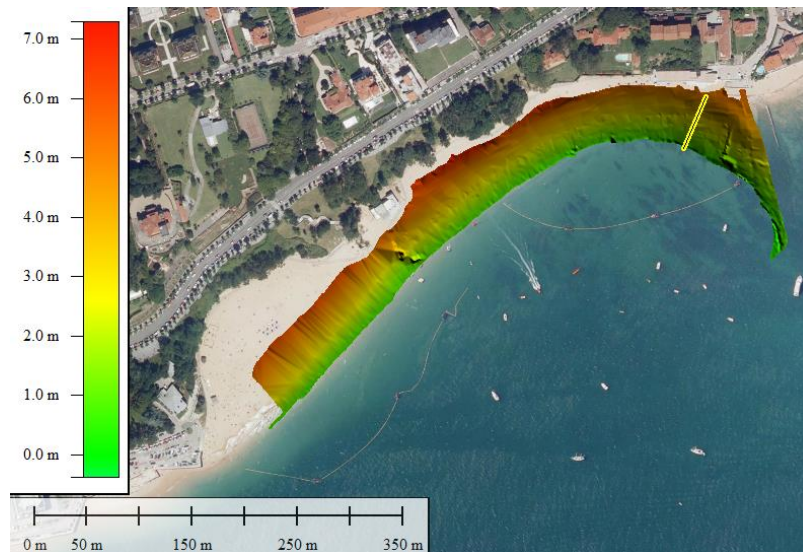


Figura 50: Batimetría medida el 29 de septiembre de 2019. En amarillo, un perfil de la misma.

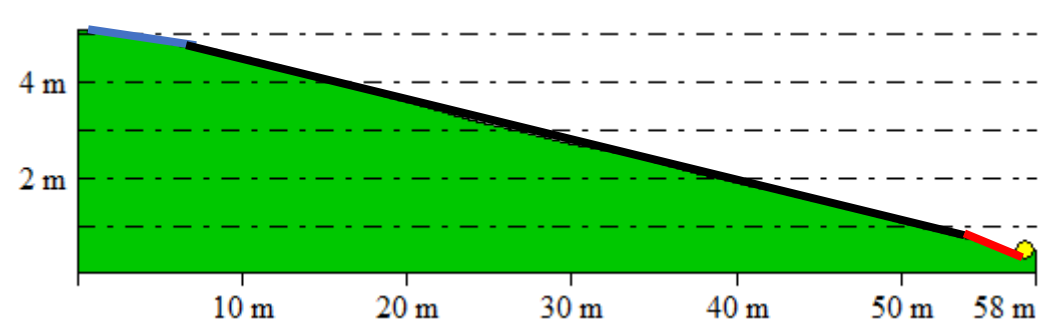


Figura 51: Perfil medido de la playa, en azul la parte alta de la playa, en negro la parte media, y en rojo la parte baja de la playa.

Por otro lado, los resultados obtenidos en la cámara 2 muestran la validez del método, ya que en el caso de esta cámara se dispone de una rectificación adecuada de los datos, ya que se disponían de unos puntos de control adecuados. Esto se muestra a continuación.

Los resultados de la validación de la batimetría en la cámara 2 se van a mostrar mediante gráficos de probabilidad conjunta entre ambas batimetrías y mapas de anomalías espaciales, los cuales representan la diferencia en altura de los distintos puntos.

Respecto a la cámara 2, solo se dispone del primer error mencionado anteriormente, el correspondiente a la lejanía de los objetivos respecto a la cámara, ya que la rectificación se ha llevado a cabo correctamente (aunque siempre exista un ligero desfase, en esta caso es despreciable).

Comenzando con la batimetría intermareal, se muestran los gráficos de probabilidad conjunta y los mapas de anomalías espaciales.

En la figura 52 se muestra el gráfico de probabilidad conjunta entre la batimetría obtenida mediante la cámara 2 y la batimetría medida en dicha zona. Respecto a los estadísticos, se

aprecia como el error cuadrático medio es muy pequeño (0.141m), el BIAS es prácticamente cero, la desviación estándar (SI) es de 0.06m, la correlación es de 0.99 y el error cuadrado (R2) es de 0.988. A su vez, la mayoría de los datos se encuentran en la línea proporcional, lo cual representa un resultado correcto obtenido mediante la metodología propuesta.

La figura 53 representa el mapa de anomalías espaciales entre ambas batimetrías, donde se distinguen dos zonas. A la izquierda, una zona en tono rojizo (con una diferencia entre ambas batimetrías muy pequeña), en la cual se representa la ligera sobreestimación por parte de la batimetría obtenida en la cámara. Por otro lado, en la parte derecha de la figura, se muestra un color verde (con una diferencia entre ambas batimetrías muy pequeña), lo cual representa una ligera subestimación por parte de la batimetría obtenida de la cámara. Cabe destacar que ambas diferencias son muy pequeñas.

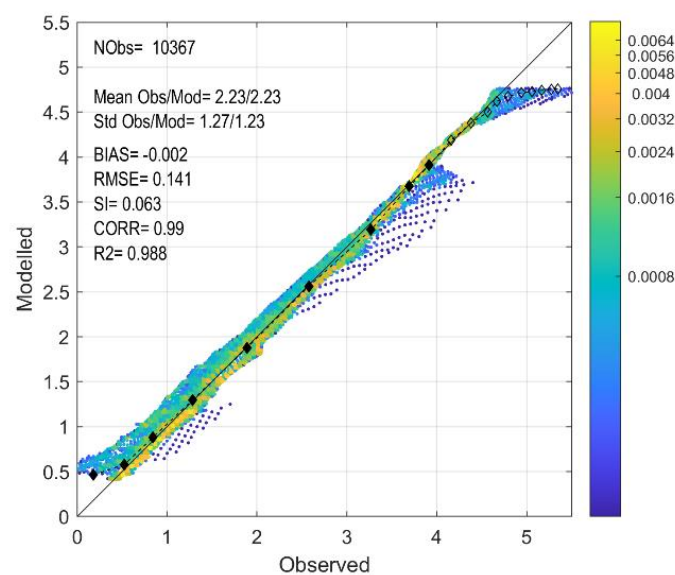


Figura 52: Gráfico de dispersión de probabilidad conjunta entre la batimetría medida (eje x) y la batimetría intermareal capturada mediante la cámara 2 (eje y).



Figura 53: Mapa de anomalías espaciales, donde el color rojo representa la sobreestimación por parte de la batimetría intermareal obtenida en la cámara 2 y el color azul la subestimación.

Respecto a la batimetría submareal de la cámara 2, es necesario recordar, que en la validación del modelo batimétrico llevada a cabo previamente, este subestimaba la batimetría con la cual se estaba comparando.

En la figura 54 se muestra el gráfico de probabilidad conjunta entre la batimetría submareal estimada mediante el modelo batimétrico y la batimetría medida. Se aprecia como el modelo subestima la batimetría medida, tal y como se había observado en la auto validación del modelo. A su vez, en la figura 55 se aprecia como gran parte de la zona se encuentra totalmente subestimada respecto a la realidad, exceptuando la zona más cercana a tierra, la cual cuadra correctamente con la batimetría medida.

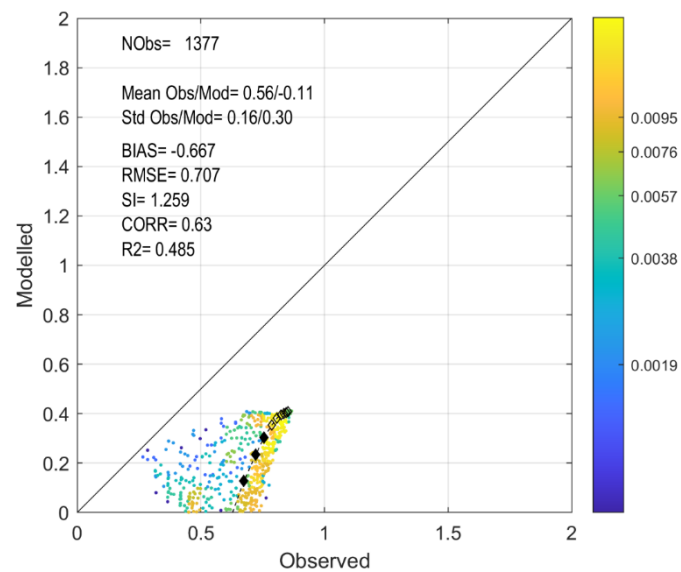


Figura 54: Gráfico de dispersión de probabilidad conjunta entre la batimetría medida (eje x) y la batimetría submareal capturada mediante la cámara 2 (eje y).

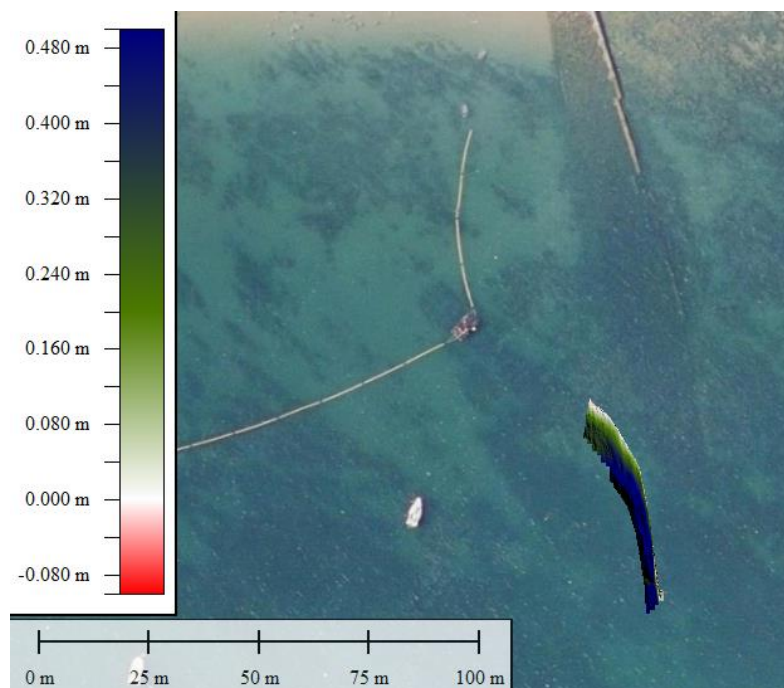


Figura 55: Mapa de anomalías espaciales, donde el color rojo representa la sobreestimación por parte de la batimetría submareal obtenida en la cámara 2 y el color azul la subestimación.

Por lo tanto, se ha demostrado que la metodología empleada otorga buenos resultados, y permite disponer de batimetrías obtenidas mediante el uso de imágenes.

4.3. DISCUSIÓN

Comenzando con la batimetría intermareal, es necesario llevar a cabo una discusión de la validación llevada a cabo con los datos reales medidos el 29 de septiembre de 2019.

Es importante destacar que el error resultado de la rectificación de los datos en la cámara 1 es elevado, y esto ha implicado llevar a cabo un análisis cualitativo de los resultados, donde se ha mostrado como las tendencias en términos de pendiente de playa cuadran correctamente, al comparar la batimetría obtenida mediante videometría y la batimetría medida, por lo que, para estudios posteriores, será necesario disponer de unos datos correctamente rectificados.

Se ha llegado a la conclusión de que la rectificación de los datos obtenidos en la cámara 1 no son adecuados debido a que es un hecho que la Playa de la Magdalena no dispone de discontinuidades notorias en la línea de costa, y, por lo tanto, en la zona cercana a la cámara la playa es más angosta de lo que es realmente, por lo tanto, con una rectificación correcta, se ampliaría dicha zona transversalmente. Por otro lado, en la parte lejana de la playa se da un proceso similar pero reverso, es decir, la zona transversal continúa siendo angosta, pero en este caso debe ampliarse hacia la zona de tierra.

Respecto a la batimetría obtenida mediante la cámara 2, cabe destacar los buenos resultados obtenidos, con un error cuadrático medio alrededor de 0.1m. En este caso, la rectificación llevada a cabo no es la ideal, y esto se aprecia a medida que el objetivo se aleja de la cámara, pero es mucho mejor que la obtenida en la cámara 1

Respecto a la batimetría submareal, se va a comenzar discutiendo los resultados de los parámetros obtenidos para llevar a cabo la estimación de la batimetría.

Se ha podido observar como el modelo batimétrico propuesto es consistente, gracias a las características que se han ido observando a lo largo de los resultados obtenidos. A continuación, se procede a describir cada una de ellas.

Los parámetros α , β y Z_0 han mostrado comportamientos similares en ambas cámaras en términos de tendencias. El parámetro α ha mostrado una tendencia negativa desde pleamar hasta bajamar, el parámetro β una tendencia negativa desde pleamar hasta bajamar, y el parámetro Z_0 una tendencia positiva desde pleamar hasta bajamar, donde estos dos últimos disponen de valores semejantes.

El parámetro α es el coeficiente de ajuste del modo espacial U_2 , el cual dispone de valores muy pequeños del orden de $1 * 10^{-4}$, y es por ello que α tiene valores altos. El valor de este parámetro disminuye al acercarse a bajamar debido al valor de U_2 de la línea de costa detectada mediante el IHOLLIN, ya que este se aleja de 0 en las imágenes de bajamar, por lo que el parámetro α tiende a disminuir. Además, este parámetro en la cámara 2 ha mostrado valores más pequeños que la cámara 1, además de una menor pendiente de la regresión lineal, lo cual ha derivado en la sobreestimación de la profundidad por parte del modelo batimétrico. Por lo tanto, es este parámetro uno de los que habrá que modificar para mejorar los resultados del modelo.

El parámetro β ha demostrado mejorar los resultados obtenidos mediante el modelo batimétrico, disminuyendo el error obtenido. Es importante destacar que este parámetro no tiene influencia en las imágenes de alrededor de las 14:00, las cuales se corresponden a la pleamar, pero toma influencia en las imágenes de la mañana de alrededor de las 11:00, correspondientes a la bajamar, debido a que las imágenes son más oscuras y cuentan con zonas de sombras. Los valores son negativos, y van aumentando en bajamar, debido a la oscuridad de la imagen, ya que cuanto más oscura sea esta, el modelo tiende a sobreestimar la profundidad, y gracias a este parámetro se corrige.

El parámetro Z_0 tiene el objetivo de corregir la referenciación de la imagen, es decir, cuando el modo espacial U_2 de la línea de costa de la batimetría intermareal no es igual a 0, se dispone de una distinta referenciación al intentar ajustar el valor de U_2 y la batimetría intermareal, por lo que este parámetro modifica el punto de referencia. Es por esto que, en las imágenes de bajamar, donde el modo espacial U_2 se aleja más de 0, Z_0 tiende a tomar un valor mayor.

A la hora de estimar la batimetría se ha aplicado una regresión lineal a los parámetros descritos en los párrafos anteriores, donde β y Z_0 se ajustan muy bien a este método. Por otro lado, el parámetro α ha mostrado dos tendencias distintas, una ligera pendiente ascendente desde pleamar hasta media marea y una pendiente brusca desde media marea hasta bajamar. En el presente estudio dicho comportamiento se ha simplificado con una regresión lineal, pero será necesario otro tipo de ajuste para mejorar la metodología.

Un concepto que se ha tenido en cuenta en ambas cámaras, es que la lejanía de la cámara empeora ligeramente los resultados obtenidos. Esto es debido a que la captura de la propia cámara tiene cierta oblicuidad, es decir, el ángulo con el que se obtiene cada píxel es distinto, y la lejanía provoca que la batimetría submareal vista en cada imagen quede a una mayor profundidad, lo cual puede justificar la sobreestimación de la profundidad observada en la cámara 2, y en el caso de la cámara 1, el no haber obtenido la batimetría submareal en toda la playa.

Finalmente, el modelo demuestra ser sólido, ya que las estimaciones realizadas muestran muy buenos resultados en los gráficos de probabilidad conjunta, y aunque los resultados obtenidos en la validación de la cámara 2 han demostrado sobreestimar la profundidad, dichas estimaciones tienen concordancia entre sí.

Las mejoras propuestas para el modelo se describirán en el último capítulo.

Respecto a la validación de las batimetrías submareales obtenidas respecto a la batimetría real, comenzando por la cámara 1, se ha podido observar cómo cualitativamente, los resultados son adecuados.

La cámara 2, al igual que se ha mencionado en párrafos anteriores, ha demostrado subestimar la batimetría real, concordando con lo visto en la auto validación del modelo batimétrico, lo cual consolida el modelo.

Es posible disponer de batimetrías de la playa mediante el uso de imágenes, lo cual genera un avance respecto a las medidas convencionales, así como las salidas de campo, ya que mediante el uso de imágenes se dispone de una batimetría diaria. Cabe destacar, que mediante la metodología empleada, la productividad de la misma permite obtener alrededor de dos batimetrías en un día de trabajo.

5. ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN Y ESTABILIDAD MORFOLÓGICA DE LA PLAYA DE LA MAGDALENA

5.1. INTRODUCCIÓN

El proyecto de estabilización del sistema de playas Magdalena-Peligros comenzó en el año 2017, por lo que el IHCantabria implantó una estación de monitorización cercana al Restaurante Balneario de la Magdalena, para captar la evolución de la playa mediante imágenes, y así posteriormente analizar su evolución.

Haciendo uso de la información obtenida de la estación, se ha podido desarrollar una metodología para obtener la batimetría intermareal y submareal diaria que ha sido aplicada en la Playa de la Magdalena.

En el presente capítulo se va a aplicar la metodología propuesta en varios días seleccionados, para obtener la batimetría y así poder analizar la evolución morfológica de la Playa de la Magdalena. La batimetría intermareal se obtendrá para ambas cámaras, mientras que la batimetría submareal solamente se obtendrá para la cámara 1, debido a que el modelo batimétrico subestima la batimetría real en la cámara 2.

La evolución morfológica de la Playa de la Magdalena se va a analizar en largo plazo, estudiando la evolución de la línea de costa en distintas fechas, la variación del volumen de arena entre una fecha y otra, y calculando las tasas de transporte, todo esto mediante las batimetrías obtenidas previamente. Finalmente, se mostrarán las conclusiones obtenidas en el presente capítulo.

5.2. ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN A LARGO PLAZO DE LA BATIMETRÍA

Para llevar a cabo el análisis a largo plazo de la evolución morfológica de la Playa de la Magdalena son necesarias batimetrías en días específicos alternos en el tiempo.

Estos días, se han seleccionado, siempre y cuando ha sido posible, en función de los siguientes criterios:

- Alternancia estacional entre ellos.
- Rango de marea más amplio.
- Calidad de las imágenes.

Así es como se va a llevar a cabo un análisis estacional, y para ello, se han escogido las siguientes fechas para la construcción de la batimetría:

- 2 de enero de 2018
- 16 de mayo de 2018
- 10 de septiembre de 2018
- 22 de enero de 2019
- 22 de marzo de 2019

- 30 de agosto de 2019

El objetivo de la selección es obtener una batimetría cada cuatro meses para disponer de una batimetría de cada estación del año, pero debido a los problemas y el mantenimiento de las cámaras, no se ha podido obtener batimetrías en días idóneos. Aún así, en un periodo de 2 años, se dispone aproximadamente de dos batimetrías invernales, dos primaverales y dos batimetrías del periodo estival, todas ellas con un rango de marea suficientemente amplio como se muestra a continuación.

5.2.1. DETERMINACIÓN DE LAS BATIMETRÍAS

En el presente apartado se van a determinar las batimetrías obtenidas en las distintas fechas de estudio para ambas cámaras mediante la metodología descrita en el presente estudio, solamente se van a mostrar los resultados más representativos.

Se van a mostrar todos los resultados en conjunto, de todas las fechas seleccionadas y de ambas cámaras. Los resultados no relevantes en términos de disponer de características específicas se adjuntarán en el Anexo V.

Comenzando con las imágenes, y sus correspondientes niveles del mar asociados al instante de captura, en el Anexo V se adjuntan cada una de ellas, tanto de la cámara 1 como de la cámara 2, puesto que algunas imágenes no han podido ser representadas, al igual que en el 29 de septiembre de 2019.

Mediante la metodología descrita en el capítulo 3, se obtienen las batimetrías intermareales para los distintos días, y ambas cámaras. Para poder apreciar las características de la playa en los días seleccionados, se van a mostrar imágenes de ambas cámaras de la playa en 2D, en las figuras 56, 57, 58, 59, 60 y 61. Las más importantes a destacar son las primeras 2, donde se muestran las correspondientes al 2 de enero de 2018, y al 16 de mayo de 2018. El 2 de enero de 2018 se aprecia el dique aún sin construir y unas líneas de costa detectadas totalmente irregulares debido a la gran cantidad de rocas que se encuentran en la playa. A su vez, se observa como la línea de costa llega hasta el contorno rígido, y como se mostrará más adelante, con un nivel del mar de 3 metros, lo que representa que la playa dispone de menos arena. El 16 de mayo de 2018 se corresponde a las fechas en las cuales se llevaron a cabo los aportes de arena, y se aprecian unas líneas de costa irregulares debido a dicho aporte en la zona alta de la playa.

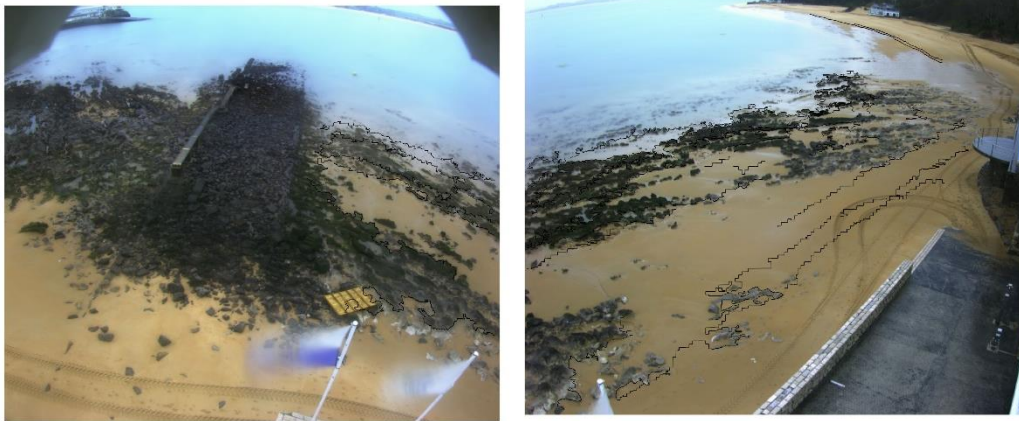


Figura 56: Batimetría intermareal (líneas negras) construida el 2 de enero de 2018 con la cámara 1 (derecha) y con la cámara 2 (izquierda).

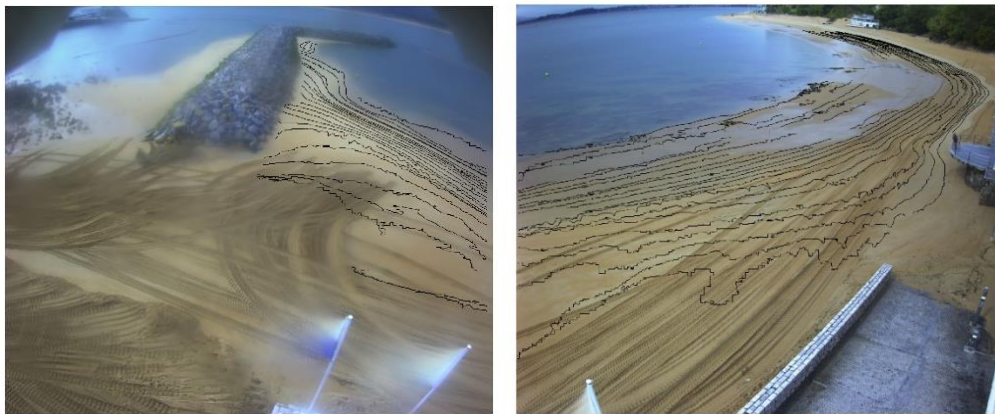


Figura 57: Batimetría intermareal (líneas negras) construida el 16 de mayo de 2018 con la cámara 1 (derecha) y con la cámara 2 (izquierda).

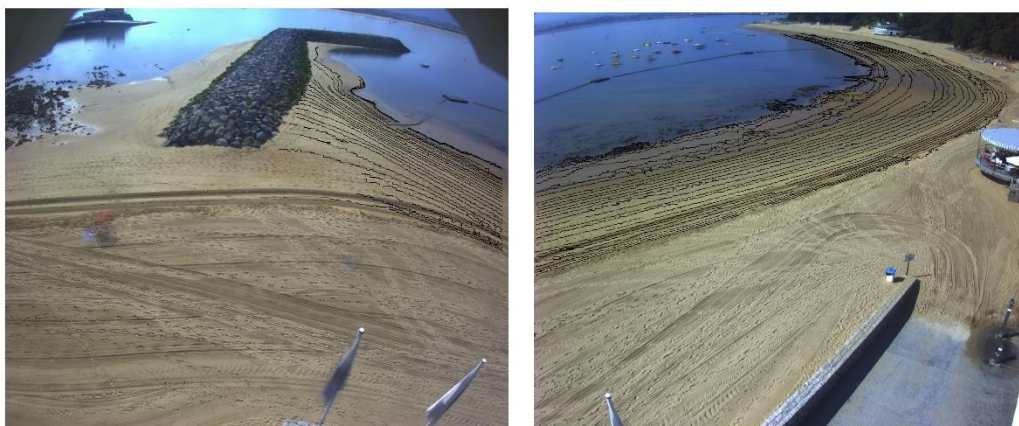


Figura 58: Batimetría intermareal (líneas negras) construida el 10 de septiembre de 2018 con la cámara 1 (derecha) y con la cámara 2 (izquierda).

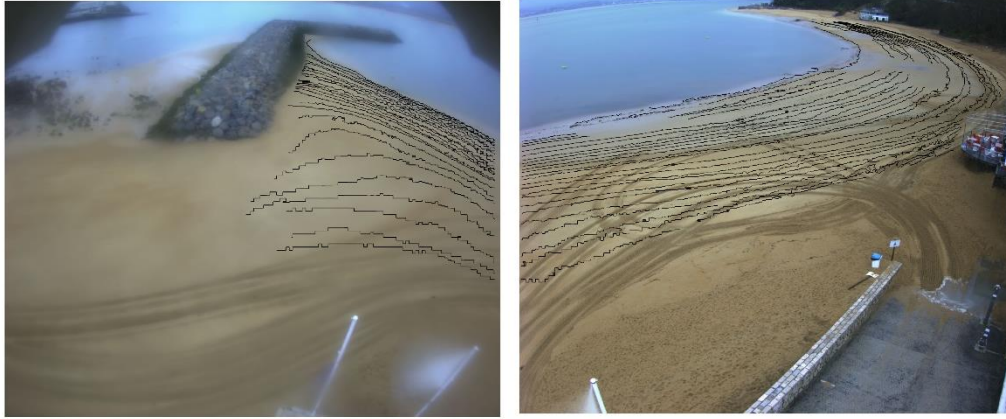


Figura 59: Batimetría intermareal (líneas negras) construida el 22 de enero de 2019 con la cámara 1 (derecha) y con la cámara 2 (izquierda).

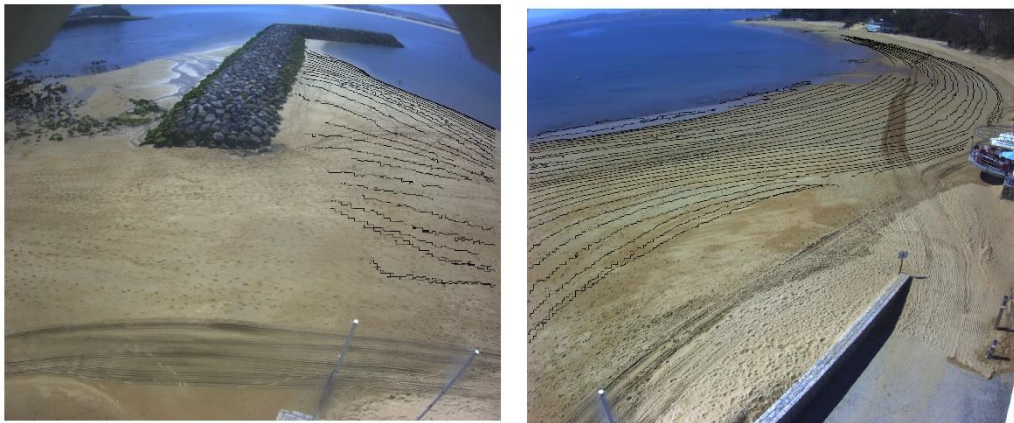


Figura 60: Batimetría intermareal (líneas negras) construida el 22 de marzo de 2019 con la cámara 1 (derecha) y con la cámara 2 (izquierda).



Figura 61: Batimetría intermareal (líneas negras) construida el 30 de agosto de 2019 con la cámara 1 (derecha) y con la cámara 2 (izquierda).

Para la obtención de la batimetría submareal, se muestra una tabla resumida de los parámetros obtenidos, y los parámetros utilizados tanto para la estimación como para la validación del modelo para cada día seleccionado en la cámara 1. A modo de complemento, en el Anexo V se muestran los gráficos de parámetros de calibración y estimación.

En las tablas 3, 4, 5, 6, 7 y 8, se muestran los resultados más relevantes, cuya interpretación se describe a continuación. Comenzando desde un aspecto general, todas las tablas muestran un parámetro de α descendente desde pleamar hasta bajamar en términos globales, lo cual revela que la tendencia general de dicho parámetro es descendente desde pleamar hasta bajamar. Además, estos valores se encuentran en un rango alrededor de 1000 y 3500, y dentro de este rango, los valores varían en función de la fecha seleccionada.

El parámetro β muestra una tendencia descendente en la mayoría de los casos, y varía en un rango entre -5 y 1, adoptando muchos más valores negativos que positivos. Esta tendencia no se da en las fechas correspondientes al 2 de enero de 2018 y 10 de septiembre de 2018, donde dispone de tendencia positiva, y abarca entre -2 y 1 en términos generales.

Continuando con el parámetro Z_0 , en la mayoría de los casos muestra una tendencia ascendente, y varía en un rango comprendido alrededor de -0.5 y 3, adoptando más valores positivos que negativos. Nuevamente, el 2 de enero de 2018 y el 10 de septiembre de 2018, se da un cambio de tendencia, donde este tiende a disponer de una tendencia negativa, con valores entre -0.5 y 2.

La profundidad límite, h' , toma valores ligeramente mayores a 1m (en los casos utilizados para la calibración), y es similar en todos los casos. Respecto al error cuadrático medio, se encuentra en torno a 0.15m (en los casos utilizados para la calibración) nuevamente para todas las fechas seleccionadas.

Para la validación de la batimetría submareal estimada, se ha tenido en cuenta la primera imagen no utilizada para calibrar el modelo, es decir, donde se comienza a estimar los resultados. En todas las fechas seleccionadas, los valores se encuentran entre 1.1m y 1.3m. El error cuadrático medio de dicha validación oscila entre 0.09m y 0.21m. Los valores de α , β y Z_0 muestran valores similares (teniendo en cuenta el rango en el que oscilan), en todas las fechas, excepto el 2 de enero de 2018 y el 10 de septiembre de 2018, donde se alejan ligeramente de la tendencia general.

Las estimaciones se han llevado a cabo en las imágenes no utilizadas para la calibración, y se mostrarán más adelante las asociadas a la imagen a partir de la cual ya no se dispone de ningún dato de batimetría, es decir, estimación neta. Existe una excepción el 2 de enero de 2018, ya que se representará la estimación asociada a las 10:29, debido a que las dos últimas (las cuales se corresponden a un nivel del mar más bajo, y por lo tanto proporcionan un mayor área de estimación neta) aportaban datos en una zona pequeña de la playa. Al igual que se ha mencionado en el anterior párrafo de validación, los valores de α , β y Z_0 muestran valores similares (teniendo en cuenta el rango en el que oscilan), en todas las fechas, excepto el 2 de enero de 2018 y el 10 de septiembre de 2018, donde se alejan ligeramente de la tendencia general.

En las fechas 10 de septiembre de 2018, 22 de marzo de 2019 y 30 de agosto de 2019, para mejorar los resultados, no se han tenido en cuenta ciertas imágenes, comenzando desde la pleamar.

Finalmente, destacar que en todas las fechas se dispone de un amplio rango de marea con suficientes imágenes, aunque en el caso del 2 de enero de 2018, no se dispongan de más datos a partir de los 3 metros, debido a que a dicha altura el oleaje ya casi alcanzaba el muro, por lo que el propio muro era la línea de costa.

Tabla 3: Valores de los parámetros α , β y Z_0 , y el error obtenido para cada profundidad ajustada en cada imagen, 2 de enero de 2018.

	Hora	$h'(m)$	RMSE(m)	alfa	beta	Z_0	%h	Nivel del mar (m)
	1249	1.238	0.103	1922.02	-1.62	1.93	54.8	3.07
	1229	1.185	0.137	2406.92	-2.58	2.35	61.0	2.754
	1209	1.006	0.148	1846.62	-1.62	1.61	61.9	2.438
	1139	1.049	0.196	2351.63	0.19	0.40	89.5	1.984
	1129	1.02	0.201	1546.15	0.18	0.40	100.0	1.832
	1109	0.634	0.131	1168.28	0.44	0.05	83.8	1.569
	1059	0.497	0.082	606.40	0.25	0.15	80.2	1.432
	1039	0.39	0.053	807.03	0.12	0.05	100.0	1.202
	1029	0.274	0.037	498.35	0.16	0.02	100.0	1.086
	1009							0.935
	919							0.812
Validación	1109	1.1	0.208	1860.00	0.62	0.00		1.569
Estimación	1029	1.1		1720.00	2.15	-1.20		1.086

Tabla 4: Valores de los parámetros α , β y Z_0 , y el error obtenido para cada profundidad ajustada en cada imagen, 16 de mayo de 2018.

	Hora	$h'(m)$	RMSE(m)	alfa	beta	Z_0	%h	Nivel del mar (m)
	1459	1.498	0.187	1729.68	0.47	0.56	41.1	4.525
	1449	1.404	0.149	1865.35	0.37	0.56	39.5	4.431
	1439	1.301	0.139	2060.52	0.56	0.39	37.7	4.328
	1429	1.184	0.129	2058.65	0.67	0.29	35.6	4.211
	1419	1.068	0.130	1764.19	0.00	0.64	33.2	4.095
	1359	0.944	0.111	1551.38	-1.15	1.13	32.1	3.822
	1349	1.133	0.111	1780.04	-2.42	1.76	40.6	3.671
	1339	1.44	0.107	2025.85	-3.98	2.52	54.5	3.521
	1329	1.125	0.080	940.10	-5.91	3.25	45.4	3.358
	1319	1.116	0.144	1569.67	-3.29	1.91	48.2	3.197
	1309	1.252	0.194	1590.23	-1.55	1.15	58.3	3.027
	1259	1.496	0.124	1866.27	-2.06	1.28	74.9	2.878
	1249	1.324	0.101	1302.60	-3.62	1.96	72.5	2.706
	1239	1.156	0.097	1377.70	-2.06	1.23	69.8	2.538
	1229	1.008	0.114	1024.93	-2.76	1.52	66.8	2.39
	1219	1.156	0.148	933.03	-3.50	1.83	85.5	2.233
	1209	1.004	0.155	946.18	-2.16	1.25	83.7	2.081
	1149	0.698	0.137	-123.51	-4.22	2.29	78.1	1.775
	1139	0.764	0.133	853.40	-2.41	1.24	100.0	1.645
	1119	0.501	0.066	345.10	-2.91	1.67	100.0	1.382
	1049							1.077
	919							0.881
Validación	1149	1.2	0.179	967.8	-4.3	2.098		1.775
Estimación	1119	1.2		623.1	-5.59	2.509		1.382

Tabla 5: Valores de los parámetros α , β y Z_0 , y el error obtenido para cada profundidad ajustada en cada imagen, 10 de septiembre de 2018.

	Hora	$h'(m)$	RMSE(m)	alfa	beta	Z_0	%h	Nivel del mar (m)
	1409	1.714	0.183	3312.16	0.46	0.21	48.0	4.288
	1359	1.751	0.165	3427.39	-0.08	0.42	51.1	4.146
	1349	1.773	0.155	3501.04	-0.59	0.58	54.1	3.994
	1339	1.076	0.075	2915.41	-0.48	0.45	34.6	3.829
	1329	1.086	0.079	3125.84	-0.20	0.30	36.9	3.66
	1319	1.089	0.069	3463.44	-0.57	0.33	39.4	3.484
	1309	1.085	0.064	3560.16	-0.60	0.26	41.9	3.306
	1259	1.079	0.068	3491.11	-0.65	0.23	44.9	3.124
	1249	1.065	0.063	3379.40	0.19	-0.12	47.8	2.948
	1239	1.586	0.068	3560.53	0.52	-0.35	78.0	2.753
	1229	1.407	0.082	3232.02	-0.08	-0.12	75.8	2.574
	1219	1.228	0.105	2485.28	-0.93	0.28	73.3	2.395
	1209	1.054	0.131	2721.06	0.97	-0.52	70.2	2.221
	1159	1.151	0.137	2557.73	0.53	-0.44	86.8	2.045
	1149	1.164	0.087	2846.79	4.07	-1.74	100.0	1.883
	1129	0.672	0.128	1166.25	-1.06	0.27	79.3	1.566
	1119	0.531	0.097	1949.51	-0.09	-0.39	75.2	1.425
	1109	0.502	0.080	1172.14	-1.30	0.31	84.2	1.315
	1059	0.413	0.045	401.78	-0.39	0.30	92.2	1.167
	1029	0.175	0.030	194.09	-0.31	0.13	100.0	0.894
	1019	0.094	0.016	86.83	-0.02	0.04	100.0	0.813
	1009							0.754
	959							0.719
Validación	1149	1.3	0.113	2500	0.20	-0.395		1.883
Estimación	959	1.3		1601	0.48	-0.8404		0.719

Tabla 6: Valores de los parámetros α , β y Z_0 , y el error obtenido para cada profundidad ajustada en cada imagen, 22 de enero de 2019.

	Hora	$h'(m)$	RMSE(m)	alfa	beta	Z_0	%h	Nivel del mar (m)
	1519	1.124	0.092	2633.79	-0.65	0.78	30.8	4.534
	1509	1.033	0.070	2879.41	-0.41	0.68	29.0	4.443
	1459	1.228	0.091	2820.82	-0.61	0.66	35.9	4.3
	1449	1.104	0.090	2596.37	-0.34	0.53	33.5	4.176
	1439	1.146	0.151	1795.27	-1.70	1.18	36.4	4.031
	1429	1.349	0.072	3401.70	0.75	-0.23	44.8	3.891
	1419	1.187	0.134	2939.27	-1.16	0.80	41.7	3.729
	1409	1.531	0.143	3273.73	-1.52	0.85	56.9	3.575
	1359	1.366	0.124	2541.16	-2.23	1.40	54.0	3.41
	1349	1.176	0.123	2343.33	-3.16	1.85	50.3	3.22
	1339	1.341	0.120	2083.68	-2.93	1.87	61.2	3.072
	1329	1.154	0.120	1606.14	-2.78	1.77	57.6	2.885
	1319	1.123	0.108	1908.16	-0.88	0.42	61.7	2.701
	1309	1.235	0.108	2109.57	-0.88	0.36	74.4	2.542
	1259	1.027	0.112	1782.39	-2.33	1.25	70.7	2.334
	1249	1.081	0.127	1901.11	-2.66	1.40	82.5	2.193
	1239	1.162	0.085	1838.11	-3.28	1.89	100.0	2.044
	1219	0.619	0.115	1454.37	0.89	-1.20	72.9	1.731
	1209	0.696	0.111	696.99	-0.61	0.40	100.0	1.578
	1149	0.425	0.093	871.91	-1.07	0.51	100.0	1.307
	1129							1.112
	1059							0.882
Validación	1219	1.2	0.214	1632.00	-3.05	1.60		1.731
Estimación	1059	1.2		1244.00	-3.91	1.88		0.882

Tabla 7: Valores de los parámetros α , β y Z_0 , y el error obtenido para cada profundidad ajustada en cada imagen, 22 de marzo de 2019.

	Hora	h'(m)	RMSE(m)	alfa	beta	Z0	%h	Nivel del mar (m)
	1519	1.107	0.205	1840.50	0.17	0.22	29.1	4.426
	1509	1.157	0.220	2024.33	0.26	0.14	31.6	4.293
	1459	1.204	0.216	2220.78	0.26	0.06	34.1	4.158
	1449	1.429	0.196	2488.18	-0.44	0.22	42.2	4.01
	1439	1.269	0.186	2480.36	-0.22	0.03	39.4	3.85
	1429	1.104	0.172	1955.12	-0.79	0.37	36.1	3.685
	1419	1.099	0.183	2322.37	-0.72	0.15	38.4	3.49
	1409	1.116	0.169	2522.31	-0.65	0.01	41.5	3.319
	1359	1.298	0.162	2728.61	-1.01	0.09	51.7	3.136
	1349	1.116	0.143	2137.94	-1.58	0.49	48.0	2.954
	1339	1.097	0.134	1893.29	-2.12	0.73	51.1	2.772
	1329	1.085	0.125	2166.38	-0.81	0.07	55.5	2.581
	1319	1.052	0.119	1647.46	-2.45	0.86	59.6	2.391
	1309	1.02	0.134	1259.78	-2.24	0.91	64.7	2.203
	1259	1.183	0.136	1883.82	-2.51	0.67	85.0	2.018
	1249	1.003	0.115	1184.04	-2.58	0.99	82.8	1.838
	1239	1.048	0.120	1142.43	-3.17	1.20	100.0	1.675
	1229	0.661	0.103	581.63	-2.20	1.01	76.1	1.496
	1219	0.504	0.080	549.78	-1.68	0.74	70.8	1.339
	1209	0.556	0.080	181.52	-2.60	1.26	100.0	1.183
	1159	0.427	0.070	48.41	-1.32	0.81	100.0	1.054
	1139							0.835
	1119							0.627
Validación	1229	1.14	0.127	1214	-3.099	0.992		1.496
Estimación	1119	1.14		695.5	-4.137	1.295		0.627

Tabla 8: Valores de los parámetros α , β y Z_0 , y el error obtenido para cada profundidad ajustada en cada imagen, 30 de agosto de 2019.

	Hora	h'(m)	RMSE(m)	alfa	beta	Z0	%h	Nivel del mar (m)
	1409	1.269	0.131	2089.68	-1.31	1.16	34.1	4.659
	1359	1.164	0.102	2113.12	-1.37	1.09	32.2	4.554
	1349	1.052	0.109	2077.94	-1.25	0.91	30.1	4.442
	1339	1.098	0.121	2148.48	-1.06	0.77	32.5	4.318
	1329	1.123	0.139	2290.36	-0.69	0.57	34.7	4.183
	1319	1.16	0.100	2726.98	-0.78	0.54	37.4	4.041
	1309	1.167	0.084	2765.36	-1.19	0.69	39.7	3.884
	1259	1.18	0.077	2784.91	-1.61	0.83	42.4	3.729
	1249	1.173	0.093	2634.96	-2.08	0.97	44.8	3.563
	1239	1.164	0.066	2745.17	-0.78	0.26	47.6	3.39
	1229	1.142	0.090	2332.37	-2.41	0.99	50.2	3.22
	1219	1.132	0.087	2326.51	-2.47	0.90	53.5	3.06
	1209	1.097	0.111	2263.45	-2.37	0.79	56.6	2.881
	1159	1.067	0.084	2406.71	-1.26	0.22	60.1	2.717
	1149	1.135	0.118	1769.53	-3.95	1.43	70.7	2.549
	1139	1.087	0.144	1301.62	-4.05	1.57	75.1	2.39
	1129	1.017	0.089	2142.88	-2.34	0.53	79.3	2.226
	1119	1.135	0.102	1438.83	-4.15	1.43	100.0	2.078
	1109	0.625	0.066	816.61	-3.80	1.45	63.5	1.928
	1059	0.575	0.063	227.38	-4.60	1.90	68.4	1.784
	1049	0.522	0.075	834.05	-3.39	1.22	73.8	1.65
	1039	0.401	0.076	520.90	-2.46	0.96	68.4	1.529
	1029	0.348	0.057	246.83	-2.49	1.03	73.9	1.414
	1019	0.237	0.037	225.49	-2.04	0.82	65.8	1.303
	1009	0.266	0.028	282.06	-1.38	0.51	100.0	1.209
	959	0.185	0.026	370.38	-0.91	0.26	100.0	1.128
	949							1.066
	919							0.943
Validación	1109	1.13	0.094	1716	-3.53	1.00		1.928
Estimación	919	1.13		1300	-4.54	1.08		0.943

Como se ha mencionado previamente, la validación se ha llevado a cabo en la imagen de estimación donde más datos de la batimetría intermareal se dispone para validar a partir de ella los obtenidos mediante la estimación. Los resultados de la validación son correctos en términos generales, ya que disponen de unos parámetros estadísticos de un error cuadrático medio entre 0.09m y 0.22m, el BIAS es cercano a 0, exceptuando la primera fecha (debido a las múltiples rocas que capturaba la imagen), y una correlación mayor a 0.75 exceptuando enero de 2018 y 2019. Todo esto se muestra en las figuras 62, 63, 64, 65, 66 y 67.

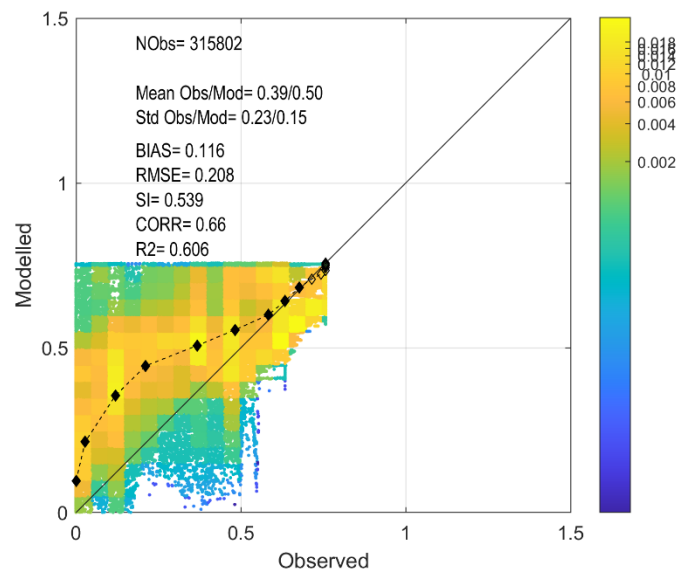


Figura 62: Gráfico de dispersión de probabilidad conjunta, eje x profundidades de la batimetría intermareal, eje y profundidades de la batimetría submareal estimada, 2 de enero de 2018 imagen de las 11:09.

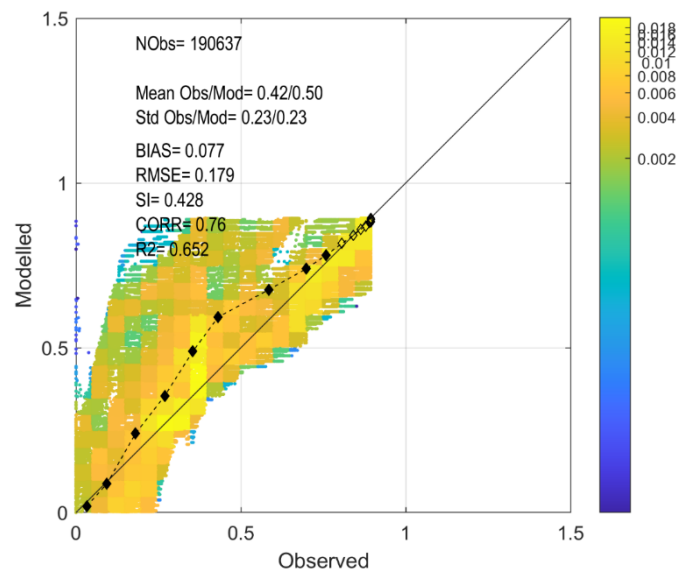


Figura 63: Gráfico de dispersión de probabilidad conjunta, eje x profundidades de la batimetría intermareal, eje y profundidades de la batimetría submareal estimada, 16 de mayo de 2018 imagen de las 11:49.

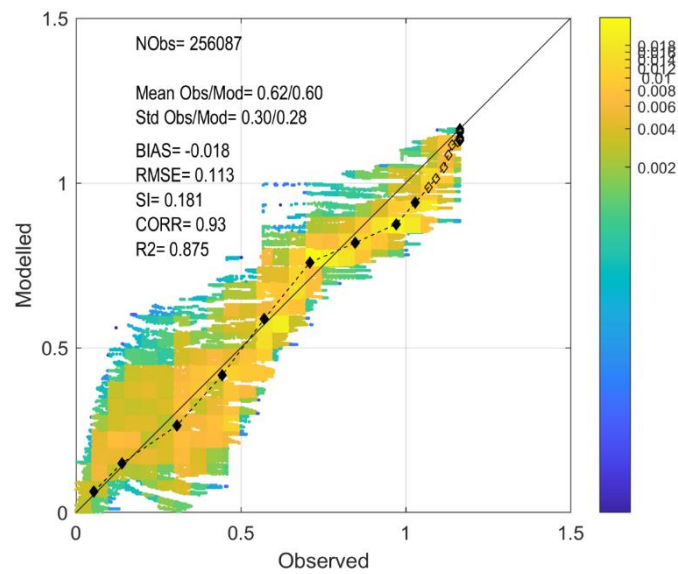


Figura 64: Gráfico de dispersión de probabilidad conjunta, eje x profundidades de la batimetría intermareal, eje y profundidades de la batimetría submareal estimada, 10 de septiembre de 2018 imagen de las 11:49.

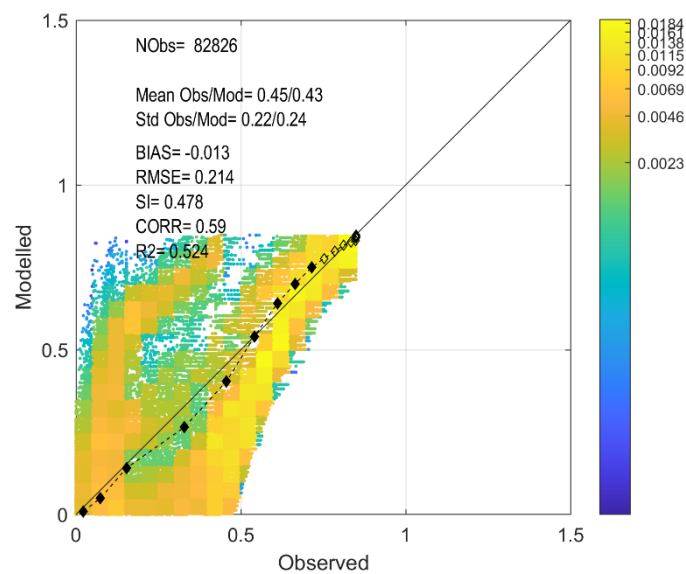


Figura 65: Gráfico de dispersión de probabilidad conjunta, eje x profundidades de la batimetría intermareal, eje y profundidades de la batimetría submareal estimada, 22 de enero de 2019 imagen de las 12:19.

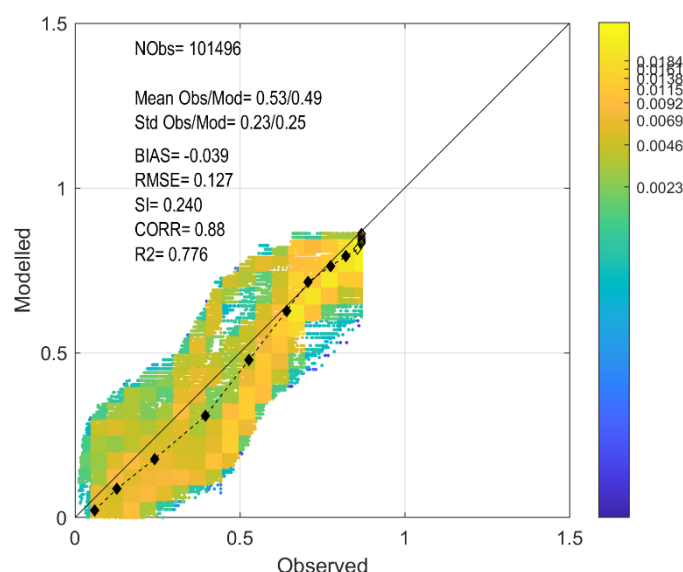


Figura 66: Gráfico de dispersión de probabilidad conjunta, eje x profundidades de la batimetría intermareal, eje y profundidades de la batimetría submareal estimada, 22 de marzo de 2019 imagen de las 12:29.

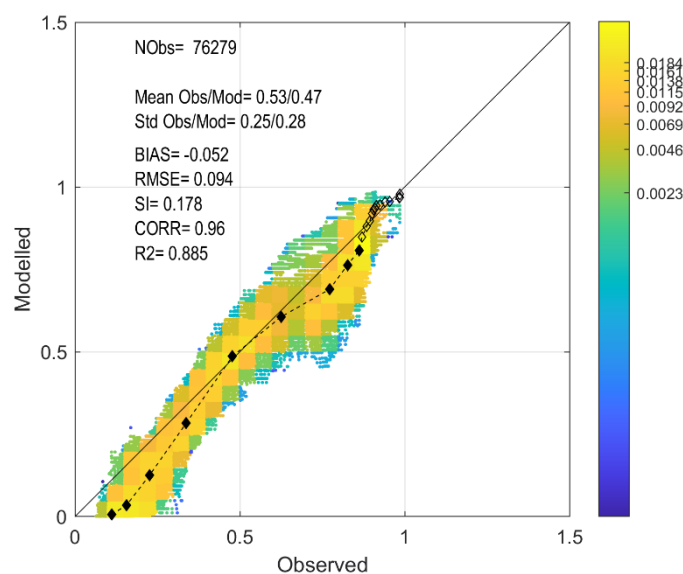


Figura 67: Gráfico de dispersión de probabilidad conjunta, eje x profundidades de la batimetría intermareal, eje y profundidades de la batimetría submareal estimada, 30 de agosto de 2019 imagen de las 11:09.

Por lo tanto, mediante el proceso llevado a cabo, se procede a mostrar los resultados de batimetría obtenidos para ambas cámaras en todos los días seleccionados.

En las figuras 68, 69, 70, 71, 72 y 73, se muestra la batimetría de la Playa de la Magdalena en los días seleccionados para ambas cámaras. En la cámara 1 la batimetría intermareal queda representada respecto al 0 del Puerto de Santander, y la batimetría submareal como profundidad respecto al nivel del mar de la imagen. En términos generales, la batimetría se puede dividir en 3 tramos, uno en la zona alta de la playa con una pendiente muy baja, otro en la zona media, donde esta pendiente aumenta, y finalmente, la parte baja de la playa, donde se aprecia una mayor pendiente que en las dos anteriores. Como características especiales, las cuales ya se han ido describiendo, la batimetría del 2 de enero de 2018 dispone de una

batimetría a una cota menor a las demás, debido a que en dicha fecha aún no se había llevado a cabo ningún aporte de sedimento. Esta es ciertamente irregular debido a las múltiples rocas que dispone. Por otro lado, la batimetría del 16 de mayo de 2018 tiene una zona alta de batimetría irregular, debido a los aportes de arena llevados a cabo recientemente y ese mismo día. A su vez, en la cámara 2, la parte baja de la playa es irregular, debido a los aportes de arena llevados a cabo recientemente. El 10 de septiembre de 2018 presenta una batimetría recta y paralela a la costa, sin irregularidades en la cámara 1 y con alguna que otra irregularidad en la zona baja de la cámara 2, aunque se aprecia un perfil de playa más adelantado. Respecto a las batimetrías del 22 de enero y marzo de 2019, destacar la pendiente muy baja de la zona alta de la playa y a su vez, una batimetría relativamente recta y paralela a la playa, al igual que el 30 de agosto de 2019.

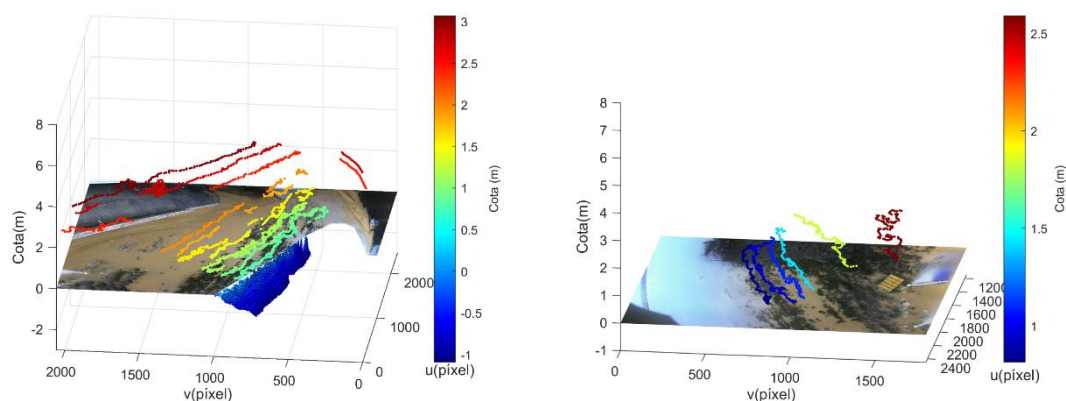


Figura 68: Batimetría de la Playa de la Magdalena el 2 de enero de 2018, cámara 1 (izquierda) y cámara 2 (derecha).

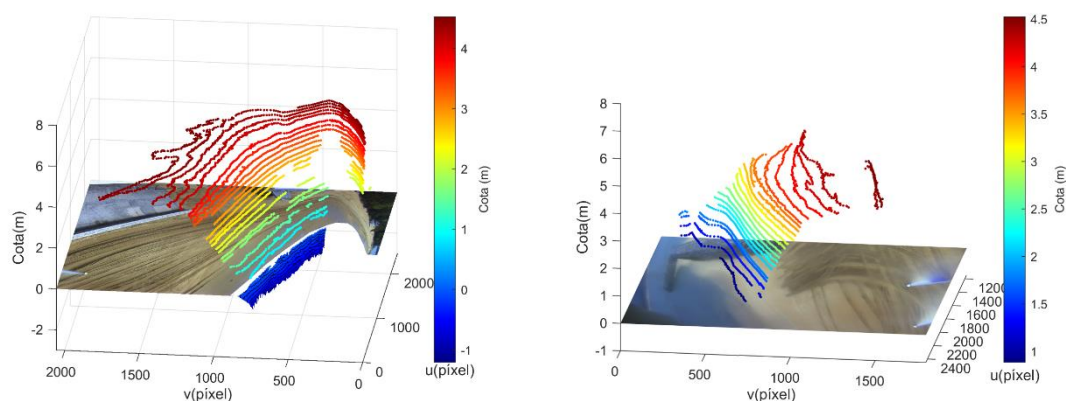


Figura 69: Batimetría de la Playa de la Magdalena el 16 de mayo de 2018, cámara 1 (izquierda) y cámara 2 (derecha).

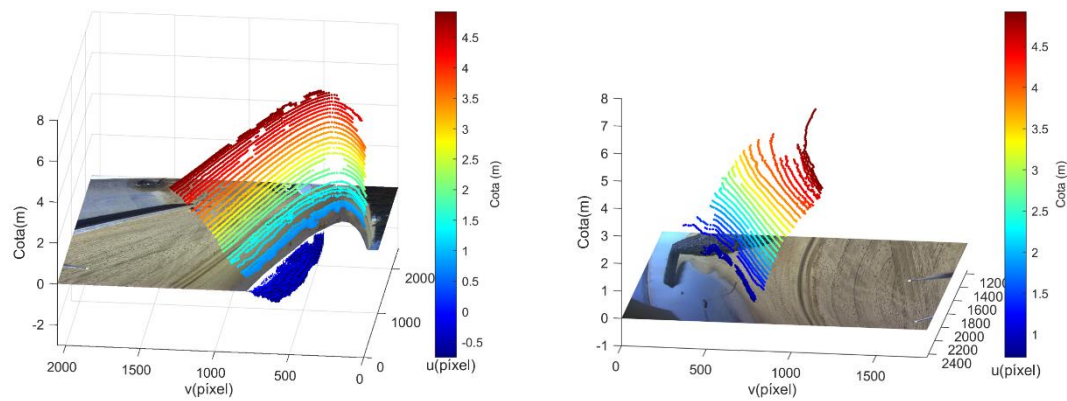


Figura 70: Batimetría de la Playa de la Magdalena el 10 de septiembre de 2018, cámara 1 (izquierda) y cámara 2 (derecha).

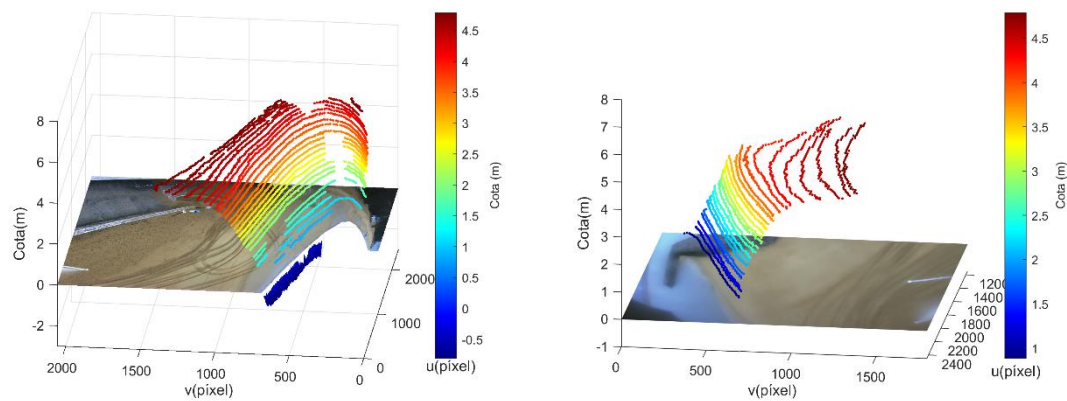


Figura 71: Batimetría de la Playa de la Magdalena el 22 de enero de 2019, cámara 1 (izquierda) y cámara 2 (derecha).

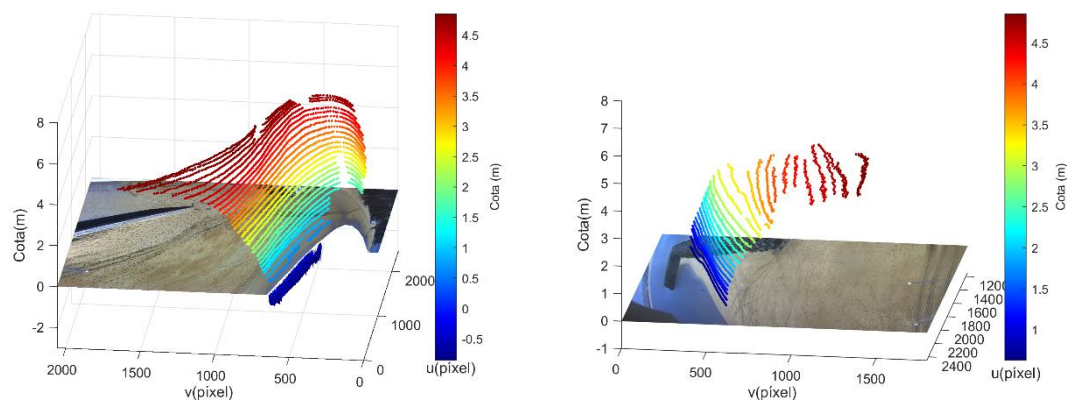


Figura 72: Batimetría de la Playa de la Magdalena el 22 de marzo de 2019, cámara 1 (izquierda) y cámara 2 (derecha).

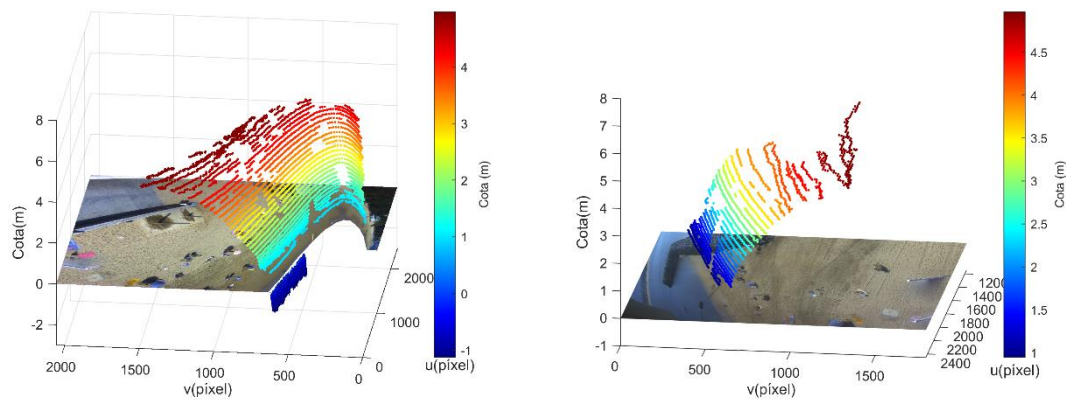


Figura 73: Batimetría de la Playa de la Magdalena el 30 de agosto de 2019, cámara 1 (izquierda) y cámara 2 (derecha).

5.2.2. RECONSTRUCCIÓN DE LAS BATIMETRÍAS

Para poder llevar a cabo el análisis de la evolución de la línea de costa, la variación del volumen y las tasas de transporte, y, por lo tanto, el análisis de la evolución morfológica de la Playa de la Magdalena, es necesario disponer de las batimetrías en coordenadas x, y, z. Por lo tanto, se va a llevar a cabo la rectificación de los resultados obtenidos en el apartado anterior.

Es necesario destacar que solamente se llevó a cabo el análisis de la evolución morfológica de la batimetría intermareal, ya que, comparados con los obtenidos de la batimetría submareal, estos abarcan una zona mucho más amplia, además, el modelo batimétrico propuesto en el presente estudio, aún se encuentra en exploración.

En el capítulo anterior se ha mostrado la validación de los resultados el 29 de septiembre de 2019 frente a una batimetría medida, tanto para la cámara 1 como para la cámara 2. Ahí se ha mostrado, que la rectificación de los datos llevada a cabo en la cámara 1 no es idónea, mientras que la cámara 2 muestra resultados más ajustados a la realidad.

Por lo tanto, puesto que la rectificación de los datos se lleva a cabo igual en todas las fechas, el error obtenido en la cámara 1, será el mismo en todas las fechas, lo cual permite llevar a cabo un análisis de la evolución de la playa en términos de tendencias de los resultados, es decir, realizar un análisis cualitativo de los resultados (avance/retroceso de línea de costa...). Respecto a la cámara 2, los resultados serán cuantitativos, puesto que se ha podido observar como la validación llevada a cabo en el capítulo anterior fue correcta.

Las batimetrías rectificadas de cada día seleccionado se muestran en el Anejo VI.

5.2.3. MORFODINÁMICA DE LA PLAYA DE LA MAGDALENA

En el presente apartado se llevará a cabo una breve descripción del sistema morfodinámico actual de la Playa de la Magdalena.

La Playa de la Magdalena, como se ha descrito anteriormente, disponía antiguamente de un problema de erosión frente al Balneario de la Magdalena, y esta arena era transportada hacia el

sur de la playa, perdiéndose al rebasar el Muelle del Promontorio. Por lo tanto, principalmente el transporte de arena en la Playa de la Magdalena es un transporte de norte a sur.

Al comenzar con las obras del proyecto de “Estabilización del sistema de playas Magdalena-Peligros”, el objetivo principal se basaba en interrumpir esta pérdida del sedimento, ya que eran necesarios aportes de arena periódicos procedentes de la Bahía de Santander.

Para estabilizar la playa, eran necesarias dos estructuras, la primera un dique frente al Restaurante Balneario de la Magdalena, el cual servía de apoyo para impedir la erosión del sedimento frente al Restaurante Balneario de la Magdalena. Y la segunda se encontraba en el Muelle del Promontorio, la cual impedía que la arena se pierda por la zona sur de la playa.

Ya que las obras se detuvieron, solamente se dispone del primer dique, el cual impide la erosión de la arena frente al Restaurante Balneario de la Magdalena, pero no se dispone del segundo dique en el sur de la playa, por lo que la arena debería seguir perdiéndose.

El primer dique crea un área protegida frente al Restaurante Balneario de la Magdalena, donde la interacción morfodinámica se resume de la siguiente manera:

- Se crea una zona protegida por la difracción del propio dique, donde los oleajes que alcanzan el extremo del dique reducen su altura de ola y modifican su dirección, creando ondas concéntricas. Este oleaje difractado deriva en un transporte de oeste a este debido a la diferencia de gradiente de altura de ola, ya que, en la zona más alejada, la altura de ola es mayor que la del oleaje difractado, y, por lo tanto, se da un transporte de sedimento hacia el dique, donde comienza a acumularse la arena. Este efecto se da con un oleaje procedente entre el rango de direcciones entre el sur y el este, pero si el oleaje es procedente del sector suroeste, este oleaje llega a la playa sin difractarse en el dique, lo cual deriva en un transporte de sedimento de este a oeste en la zona del dique, y de oeste a este a lo largo de la playa.
- El dique dispone de un área de influencia en la playa, es decir, la difracción del oleaje se da en la zona protegida por el dique. Este límite, se estima en la figura 74, donde la línea negra hace referencia al límite de afección del dique en el oleaje, por lo que al este de la línea negra, el transporte de sedimento se dará de este a oeste, como se ha mencionado en el anterior punto, y al oeste de la línea negra, continuará produciéndose el transporte de sedimento de este a oeste (norte a sur) que se ha mencionado anteriormente, debido a que no se encuentra dentro del área de influencia del dique.

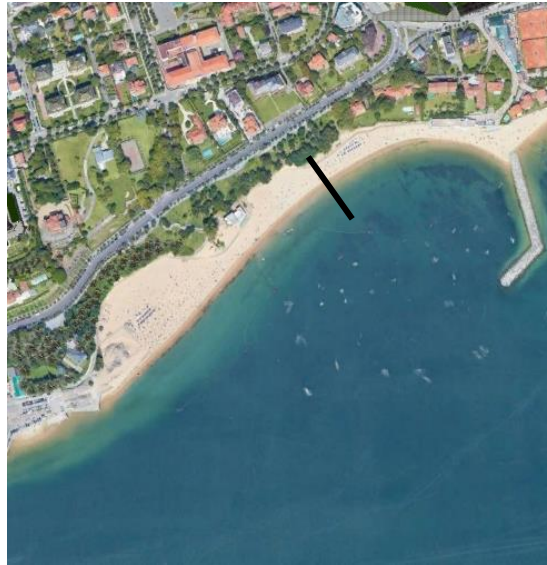


Figura 74: Ortofoto aérea de la Playa de la Magdalena, 19 de agosto de 2018. En negro, el límite de influencia del dique en el oleaje. Google Earth, NOAA.

Esta breve introducción es necesaria para entender posteriormente los procesos que se han analizado en la playa mediante el análisis de la evolución de la línea de costa, la variación del volumen y las tasas de transporte.

5.2.4. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

El análisis de la evolución de la línea de costa se basa en representar el avance o retroceso de la misma a lo largo del tiempo.

Este análisis se va a llevar a cabo a largo plazo en las fechas seleccionadas previamente, y se va a mostrar su evolución a lo largo de la playa, en distintas zonas. Se han seleccionado cuatro perfiles en la playa, a los cuales se les va a denominar P1, P2, P3 y P4. Los tres primeros se encuentran situados en la cámara 1, mientras que el cuarto se encuentra en la cámara 2.

Puesto que se dispone de varias líneas de costa para cada día seleccionado, para el presente estudio se ha decidido representar solamente una línea de costa para cada día seleccionado. Para elegir una línea de costa, se ha optado por coger los valores más cercanos al nivel medio del mar (asociado al percentil 50%), el cual es de 2.9m, menos medio metro, lo que aporta un valor de 2.4m. Este valor se ha escogido debido a que es representativo de las líneas de costa, es decir, es un valor respecto al cual se dispone de valores cercanos de nivel del mar de cada línea de costa en todas las fechas y ambas cámaras. Por lo tanto, se escogerán las líneas de costa con el nivel del mar asociado más cercano a dicho valor.

Se dispone de un error medio asociado a la altura de $\pm 0.028\text{m}$ teniendo en cuenta las líneas de costa de las distintas fechas, respecto a los 2.4m.

En la figura 75, se muestran las líneas de costa asociadas a un nivel del mar de 2.4m en las distintas fechas seleccionadas. Para caracterizar la evolución de la misma, se ha analizado el avance/retroceso de la línea de costa en distintas zonas de la playa transversalmente. En la cámara 1 se encuentran: el perfil 1 muestra la evolución en una zona protegida, cercana al dique, el perfil 2 se encuentra aún en la zona protegida por el dique, mientras que el perfil 3 queda

fuera del área de influencia del dique. En la cámara 2 se muestra el perfil 4, el cual es el más protegido de todos, y se encuentra muy cerca del dique.

La figura 76 representa la evolución de la línea de costa en los distintos perfiles descritos previamente. Cabe destacar que los valores otorgados por la cámara 1 (P1, P2 y P3) han de ser analizados en términos de tendencias, debido a los problemas descritos anteriormente.

El perfil 1 muestra un avance relativamente constante de la línea de costa hacia mar (línea negra), lo cual representa un mayor ancho de playa. Se aprecia como el avance entre las dos primeras fechas es de mayor magnitud que en las demás, ya que representa un avance exponencial de la línea de costa debido a los aportes de arena llevados a cabo en dicho periodo. Este avance exponencial no ha sido posible de captar, debido a que se ha llevado a cabo un análisis a largo plazo, pero se intuye que ha de ser así, y se podría mostrar obteniendo batimetrías en fechas más cercanas temporalmente (análisis a corto plazo). A su vez, entre septiembre de 2018 y enero de 2019, se observa otro gran avance de la línea de costa, en este caso generado por la redistribución de la arena vertida. Por otro lado, este avance va disminuyendo a medida que se alcanza el fin del periodo de estudio, lo que representa cambios menos significativos, y que la playa se está estabilizando.

En el perfil 2, no se dispone de datos sobre la línea de costa correspondiente al 16 de mayo de 2018, pero, aun así, la evolución de la línea de costa muestra como esta retrocede a lo largo del tiempo, a un ritmo relativamente constante.

El perfil 3 muestra un comportamiento muy similar al descrito en el perfil 2.

En el perfil 4, se aprecia un comportamiento muy similar al observado en el perfil 1. En total, el avance es de alrededor de 45m, y se observa como los mayores avances se dan entre enero y mayo de 2018, y entre septiembre de 2018 y enero de 2019, por los motivos mencionados en el perfil 1.

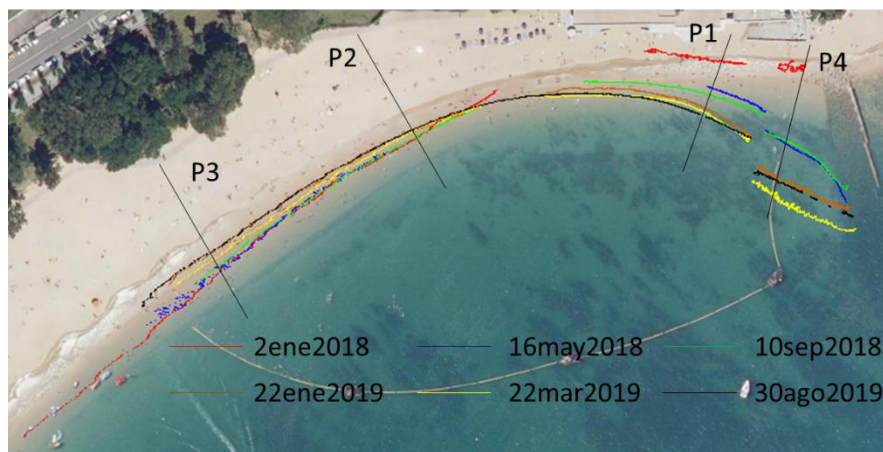


Figura 75: Mapa de evolución de línea de costa, desde enero de 2018 hasta agosto de 2019.

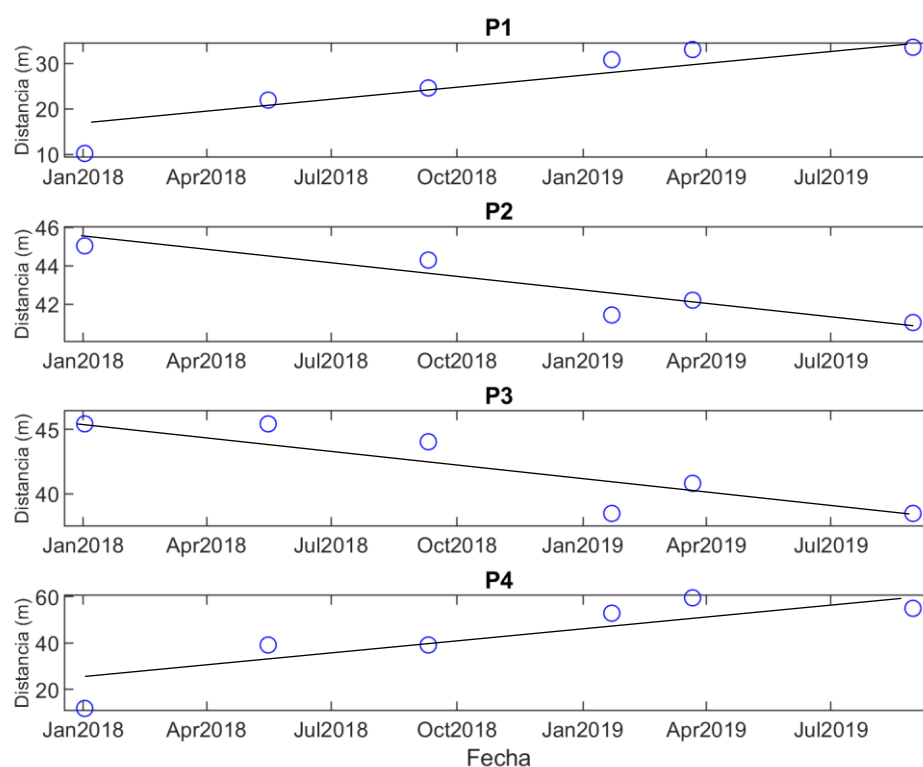


Figura 76: Gráfico de evolución de línea de costa en distintas zonas de la playa, desde enero de 2018 hasta agosto de 2019. Las líneas negras representan la tendencia de los resultados.

Por otro lado, se puede llevar a cabo un cálculo estimado de la variación del volumen disponiendo de la evolución de la línea de costa. Así, se pretende calcular cuánto volumen se ha acumulado alrededor del dique del Restaurante Balneario de la Magdalena, teniendo en cuenta los aportes de arena que se han llevado a cabo. Estos cálculos se van a llevar a cabo solamente en la batimetría obtenida mediante la cámara 2, debido a los motivos mencionados anteriormente, y a su vez, a que es la zona donde se acumula la mayor parte del sedimento, ya que se encuentra protegida por el dique.

Para calcular dicho volumen, se tiene en cuenta la distancia horizontal entre la línea de costa correspondiente al 2 de enero de 2018, la cual es la primera fecha del estudio, y la línea de costa correspondiente al 30 de agosto de 2019, la cual corresponde al final del periodo de estudio. Calculando la distancia horizontal entre ambas, la cual es de 43 metros de avance de línea de costa, teniendo en cuenta el ancho de playa en la cámara 2, el cual es de alrededor de 22 metros, y finalmente, la altura de la zona de batimetría analizada, la cual es de alrededor de 4 metros, proporciona un valor de 3800 metros cúbicos de diferencia entre ambas fechas. Este valor se comparará posteriormente con la diferencia de volumen calculada teniendo en cuenta toda la batimetría intermareal.

5.2.5. VARIACIÓN DEL VOLUMEN

Generalmente, en la mayoría de los estudios que se dan a cabo en playas, la evolución morfológica de la playa se analiza distinguiendo los procesos transversales y longitudinales de

transporte de sedimento. Un ejemplo de esto se muestra en el apartado anterior, donde se muestra la evolución de la línea de costa, es decir, un proceso longitudinal.

Mediante la metodología propuesta, se han obtenido batimetrías en distintas fechas con un intervalo medio entre ellas de alrededor de 4 meses, lo cual permite poder analizar los procesos tanto transversales como longitudinales de la playa juntos a lo largo del tiempo.

Es necesario destacar que no se disponen datos de toda la playa, se dispone de la batimetría en la zona cercana al dique, y posteriormente datos de la batimetría hasta la Punta de San Marcos, y no se dispone de datos sobre la playa seca. Por lo tanto, para disponer de un área mayor de valores, se ha decidido estimar una cota batimétrica a pie de muro, basándonos en los niveles de mar registrados y las imágenes de la estación de videomonitorización y se ha interpolado la batimetría en una parte de la playa.

La variación del volumen en la Playa de la Magdalena se va a llevar a cabo comparando las batimetrías adyacentes temporalmente, y obteniendo el volumen de arena que se gana o pierde entre ellas.

Nuevamente, es importante recordar que en la cámara 1 se obtendrán las tendencias de los resultados, y un orden de magnitud del volumen calculado.

Las comparaciones van a llevarse a cabo en fechas adyacentes, es decir, enero-mayo 2018, mayo-septiembre 2018, septiembre 2018-enero 2019, enero-marzo 2019 y marzo-agosto 2019. Como ayuda, se van a mostrar las imágenes *timex* correspondientes a la bajamar de las fechas comparadas en el Anexo VII.

En las figuras que se van a mostrar a continuación, es necesario destacar dos aspectos importantes. El primero, que se ha impuesto una cota batimétrica a una cota estimada visualmente en las imágenes, para interpolar la zona alta de la batimetría donde no se disponen de datos, y que se ha llevado a cabo de este a oeste, interrumpiéndolo donde se ha asumido que dicha playa seca no varía entre los días seleccionados. El segundo, es que en las zonas donde no se dispone de datos conjuntos de ambas batimetrías, no se dispondrá de datos sobre la variación del volumen, y es por esto que las imágenes *timex* adjuntas en el Anexo VII. ayudan a las explicaciones que se llevarán a cabo en cada figura.

En la figura 77 se muestra el mapa de variación de volumen de las cámaras 1 y 2, entre enero y mayo de 2018. Se aprecia como gran parte del mapa es de color azul, lo que indica acreción, y un aumento de la cota de alrededor de 1.5m. Queda justificado por tanto los dos aportes de arena llevados a cabo entre ambas fechas (7 de febrero y 3 de mayo en frente del Restaurante Balneario de la Magdalena), y se aprecia una gran acumulación en la parte este de la playa, en la zona donde se encuentra el dique. Cabe destacar que los volúmenes que se mostrarán a continuación están subestimados respecto a la realidad, debido a que en la parte central de la playa existe una zona donde no se dispone de datos, y en la parte cercana al dique, en la zona baja tampoco se dispone de datos, aunque se conoce que dichas zonas se han acrecionado. En la cámara 1, el volumen acumulado es de 5051.92 entre ambas fechas, por lo que se ha acumulado 1.087 metros cúbicos de arena por metro cuadrado. En la cámara 2, se ha acumulado un volumen de 1299.3 metros cúbicos de arena, lo que equivale a 1.958 metros cúbicos por metro cuadrado. Por lo tanto, en este caso se puede multiplicar el promedio obtenido de metros cúbicos por metro cuadrado de la cámara 2 con el área donde no se dispone de datos, para así obtener el volumen de arena acumulado en dicha zona. Siendo el área de alrededor de 985

metro cuadrados (rectángulo negro), esto deriva en un volumen total de 3227.93 metros cúbicos acumulados.

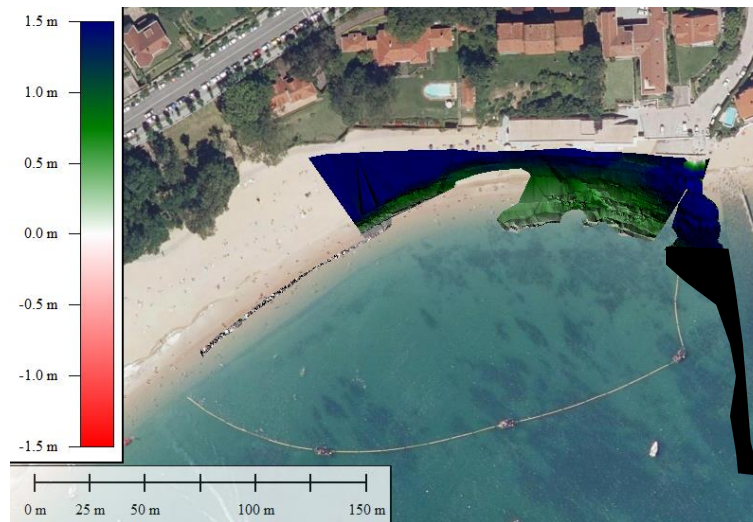


Figura 77: Mapa de variación de volumen entre las fechas 2 de enero y 16 de mayo de 2018. El color azul representa la acumulación del volumen, el color rojo la erosión del volumen y los valores la distancia vertical entre ambos puntos de la batimetría. El rectángulo negro representa el área donde no se disponen de datos conjuntos en las batimetrías de ambas fechas.

La figura 78 representa la comparación de las batimetrías correspondientes a mayo y septiembre de 2018. En este caso se aprecia una parte oeste de la playa en color rojo, lo cual significa la erosión de la arena en dicho intervalo de tiempo. Por otro lado, en la parte este de la playa se aprecia un color verde en la zona media-alta de la playa, lo cual significa la acumulación de la arena en dichas zonas. Teniendo en cuenta el área de influencia del dique (línea negra), se puede asumir que la arena que se está erosionando en la zona no influenciada por el dique, se dirige hacia el sur, mientras que la arena de la zona influenciada por el dique se dirige hacia el dique. Por otro lado, en la zona baja frente al Restaurante Balneario de la Magdalena se está produciendo un descenso de la cota, lo cual representa el transporte transversal típico de verano, es decir, de la zona baja a la zona alta de la playa (la cual se encuentra en color verde). Es necesario destacar que el 16 de mayo se llevó a cabo un aporte de arena en la parte alta de la playa donde se encuentra el dique, la cual se ha distribuido por la parte alta de la playa. En ambas fechas se aprecia mucha arena acumulada en la parte baja adyacente al dique, ya que esta zona se encuentra protegida, en el periodo estival no ha sido posible acomodar dicha arena. Finalmente, respecto a los volúmenes, se han acumulado 1154.66 y 122.29 metros cúbicos de arena, en la batimetría correspondiente a las cámaras 1 y 2, lo que deriva en un volumen por área de 0.184 y 0.085 metros cúbicos por metro cuadrado respectivamente.

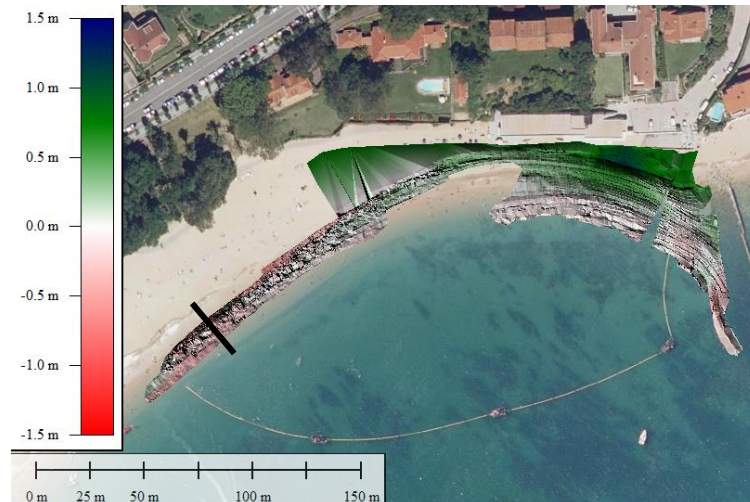


Figura 78: Mapa de variación de volumen entre las fechas 16 de mayo y 10 de septiembre de 2018. El color azul representa la acumulación del volumen, el color rojo la erosión del volumen y los valores la distancia vertical entre ambos puntos de la batimetría. La línea negra representa el límite del área de influencia del dique.

En la figura 79 se muestra la comparativa entre septiembre de 2018 y enero de 2019, donde comenzando por la parte oeste, se muestra como la playa se ha erosionado en dicha zona, y al igual que en el caso anterior se asume que la parte al oeste de la línea negra, la arena se ha transportado hacia el sur, y al este de la línea negra, influenciada por el dique hacia el propio dique. La parte alta de la playa se ha erosionado ligeramente como se puede observar, a lo largo de toda la playa, lo cual se debe a un proceso de transporte transversal de sedimento, típico del periodo invernal, de la parte alta a la parte baja de la playa. Por otro lado, frente al Restaurante Balneario de la Magdalena y en cercanías al dique, se aprecia como se ha acumulado una gran cantidad de arena, en la parte baja de la playa. Esto se debe a 2 procesos, el primero, la arena acumulada en el dique se ha redistribuido gracias a la propia energía del oleaje, derivando en una línea de costa más regular, y por otro, el propio transporte de arena de la parte alta a la parte baja de la playa. Finalmente, en la batimetría correspondiente a la cámara 1, se aprecia una erosión de 1144.14 metros cúbicos de sedimento, y por lo tanto una erosión de 0.131 metros cúbicos de arena por metro cuadrado. Este material como se ha mencionado anteriormente se ha transportado hacia la parte sur de la playa y hacia el propio dique. La batimetría asociada a la cámara 2 muestra un volumen acumulado de 902.39 metros cúbicos de arena, lo cual representa 0.558 metros cúbicos por metro cuadrado acumulados. Aunque no se puedan comparar los valores exactos de los volúmenes calculados en ambas cámaras, se aprecia que son muy similares.

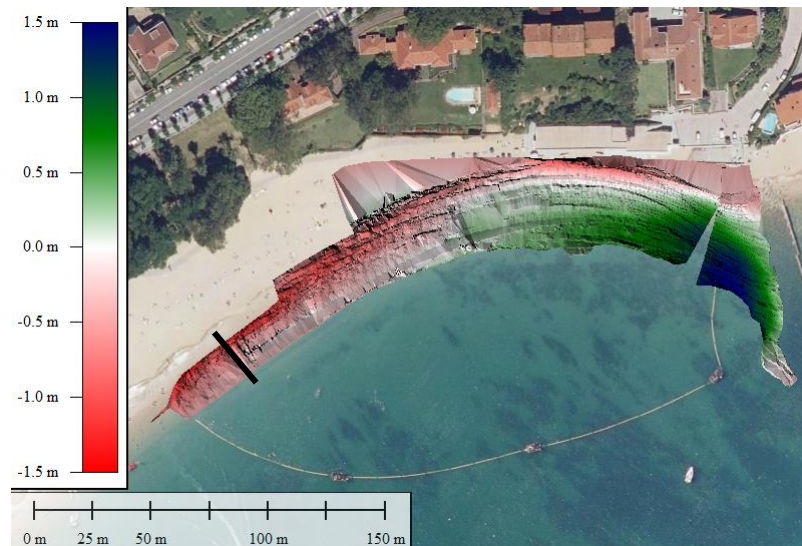


Figura 79: Mapa de variación de volumen entre las fechas 10 de septiembre de 2018 y 22 de enero de 2019. El color azul representa la acumulación del volumen, el color rojo la erosión del volumen y los valores la distancia vertical entre ambos puntos de la batimetría. La línea negra representa el límite del área de influencia del dique.

La figura 80 representa la comparativa entre las batimetrías correspondientes a enero y marzo de 2019, donde se aprecia como se ha acumulado sedimento en gran parte del área de estudio. Desde el Restaurante Balneario de la Magdalena hacia el oeste, se presenta acreción en la parte alta de la playa, mientras que en frente del mismo en la parte baja de la playa se encuentra una zona de variación nula. Por otro lado, en cercanías al dique, en la parte alta del mismo se presenta una erosión del sedimento, mientras que en la parte baja se muestra la acumulación del mismo. Este proceso, no es un proceso común como los observados en fechas anteriores, ya que ha aumentado el volumen en la parte oeste, una zona que se estaba erosionando anteriormente, y a su vez se dispone de un volumen de acumulación notorio sin ningún tipo de aporte artificial. Este proceso de acreción se explica mediante el hecho de estar en un periodo invernal, con gran energía del oleaje, y a su vez cercano a los días de máximas mareas anuales, estos dos, provocan que el nivel del mar sobrepase el dique, y cree un punto de conexión entre las playas de la Magdalena y Bikinis, por lo que se asume que el volumen acumulado procede de la Playa de Bikinis. Los volúmenes acumulados son de 1580 y 522.79 metros cúbicos, y, 0.216 y 0.261 metros cúbicos por metro cuadrado en las cámaras 1 y 2 respectivamente.



Figura 80: Mapa de variación de volumen entre las fechas 22 de enero y 22 de marzo de 2019. El color azul representa la acumulación del volumen, el color rojo la erosión del volumen y los valores la distancia vertical entre ambos puntos de la batimetría.

El periodo entre marzo y agosto de 2019 se muestra en la figura 81, donde se aprecia una erosión del sedimento en ambos extremos de la playa, siendo la del extremo este en la parte baja de la misma. A su vez, se observa una ligera acumulación del sedimento en la zona central de la playa, frente al Restaurante Balneario de la Magdalena, y en la parte alta de la playa del extremo este, adyacente al dique. Este proceso, parece relacionarse, por un lado, al transporte transversal del sedimento del periodo estival de la parte baja a la parte alta de la playa, y a su vez al transporte longitudinal de la parte este hacia el sur de la playa donde no se dispone de datos. En la diferencia entre volúmenes de la playa se aprecia una erosión de 200 y 322 metros cúbicos, y, 0.027 y 0.13 metros cúbicos por metro cuadrado en las cámaras 1 y 2 respectivamente.

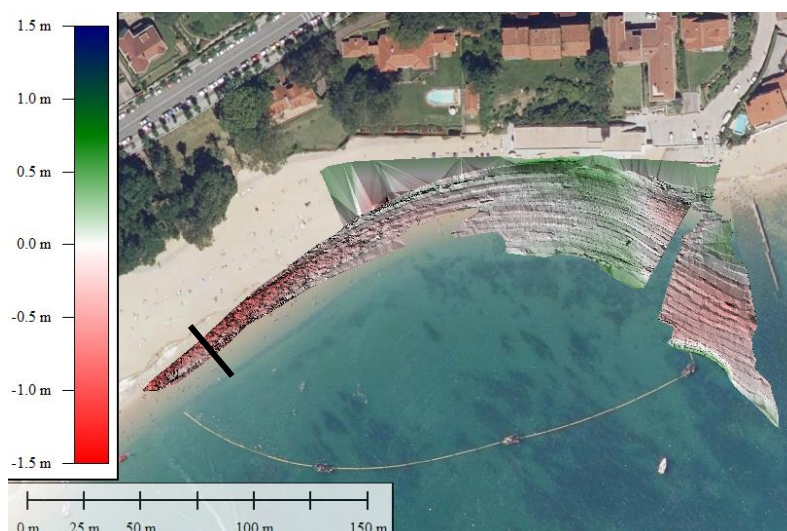


Figura 81: Mapa de variación de volumen entre las fechas 22 de marzo y 30 de agosto de 2019. El color azul representa la acumulación del volumen, el color rojo la erosión del volumen y los valores la distancia vertical entre ambos puntos de la batimetría. La línea negra representa el límite del área de influencia del dique.

A modo de resumen, en la tabla 9 se muestran los volúmenes acumulados y erosionados entre las fechas adyacentes en metros cúbicos y en metros cúbicos por metro cuadrado, haciendo referencia estos a la fecha del fin de cada intervalo.

Tabla 9: Tabla resumen de variación de volumen y volumen por área entre fechas adyacentes.

Fecha	Volumen (m^3)		Volumen por área (m^3/m^2)	
	C1	C2	C1	C2
2ene2018	-	-	-	-
16may2018	+5051.92	+3227.93	+1.087	+1.958
10sep2018	+1154.66	+122.29	+0.184	+0.085
22ene2019	-1144.14	+902.39	-0.131	+0.558
22mar2019	+1580.02	+522.79	+0.216	+0.261
30ago2019	-200.24	-322.03	-0.027	-0.13

A modo de resumen, y comparando los resultados con el apartado anterior, la arena vertida en las distintas fechas a lo largo del periodo de estudio se ha ido acumulando en cercanías al dique, siendo esta redistribuida en periodos de mayor energía. Se aprecia a su vez como las diferencias de volumen entre las distintas fechas se va tornando menor a medida que se avanza en el periodo de estudio, lo cual indica que la playa se está estabilizando.

El volumen acumulado en la zona capturada por la cámara 2, es de 4453 metros cúbicos de arena, el cual es mayor que el calculado en el apartado anterior, debido a que este se ha calculado con mayor exactitud, es decir, disponiendo de datos sobre las tres dimensiones de la playa.

Respecto a estos dos últimos conceptos mencionados, en el siguiente apartado se analizará la relación entre el volumen acumulado en la cámara 2, y otras estimaciones relacionadas al mismo a lo largo de la playa, es decir, las tasas de transporte.

5.2.6. TASAS DE TRANSPORTE

Puesto que en cercanías al dique se han acumulado 4453 metros cúbicos de arena, y teniendo en cuenta que se aportaron alrededor de 10000 metros cúbicos, más un volumen indeterminado

para permitir el paso de la maquinaria por la playa, en el presente apartado, se va a llevar un análisis cualitativo de las tasas de transporte en la playa.

En la zona capturada por la cámara 2 se han acumulado 4453 metros cúbicos de arena a lo largo del periodo de estudio (enero 2018-agosto 2019), pero a su vez, se dispone de una zona en la playa afectada por la influencia del dique, es decir, protegida por el dique. En dicha zona, no se puede cuantificar el volumen de arena acumulado, debido a los problemas que se han tenido en la cámara 1, por lo que es necesario un análisis cualitativo de los hechos.

En la zona influenciada por el dique, en la parte oeste, se ha podido observar como la línea de costa está retrocediendo, al igual que en la zona que no queda influenciada por el dique, donde la arena se está transportando hacia el sur, y posteriormente, perdiéndose en la Bahía de Santander. Este proceso es debido a que la zona no influenciada por el dique está en erosión, y aunque la zona protegida no disponga de un transporte de sedimento hacia el sur debido al oleaje, el propio sistema de la playa tiende a aportar arena desde la zona protegida hacia la zona que se encuentra en erosión, debido a la discontinuidad que se forma en la línea de costa entre ambas zonas. Es por ello que al oeste del Restaurante Balneario de la Magdalena la línea de costa está retrocediendo, ya que el transporte del sedimento se está dando de norte a sur. Por otro lado, frente al Restaurante Balneario de la Magdalena, se dispone de un volumen de arena acumulado, del cual se desconoce la cantidad, ya que dicha zona es capturada por la cámara 1.

Por lo tanto, inicialmente, una parte de la arena vertida se transportó y acomodó en cercanías al dique y frente al Restaurante Balneario de la Magdalena, cuya cantidad es de 4453 metros cúbicos de arena más la acumulada frente al Restaurante Balneario de la Magdalena. Por otro lado, la otra parte vertida se fue transportando hacia el sur de la playa, donde se desconocen los datos de batimetría, y por lo tanto de acumulación/erosión de la arena. Al final del periodo de estudio, por lo tanto, la playa se encuentra cerca de estabilizarse, y dispone de un transporte desde la parte oeste del Restaurante Balneario de la Magdalena hasta el final de la playa, en el Muelle del Promontorio. Por otro lado, frente al Restaurante Balneario de la Magdalena y al este del mismo, la arena continúa acumulándose, pero a un ritmo más lento, por lo que el transporte a su vez proviene del sur (y en casos excepcionales de la Playa de Bikinis como se ha mostrado en el apartado anterior).

5.2.7. CONCLUSIONES Y EVOLUCIÓN FUTURA DE LA PLAYA

En el presente apartado se muestran las conclusiones obtenidas del análisis de la evolución de la Playa de la Magdalena, y a su vez, se explicará la evolución futura de la misma.

Comenzando por la parte este de la playa, partiendo desde el dique, hasta el Restaurante Balneario de la Magdalena, se dispone de una zona donde el sedimento se está acumulando, como se ha podido observar en el constante avance de la línea de costa (evolución de la línea de costa) y en la acumulación de los volúmenes (variación del volumen) de arena en dicha zona. Este proceso de acumulación se ha dado debido a la combinación entre la construcción del dique, y los aportes de arena llevados a cabo. Cabe destacar que los avances de la línea de costa en dicha van disminuyendo a medida que pasa el tiempo, y a su vez los volúmenes acumulados, lo que indica que la playa se está estabilizando.

Por otro lado, la parte oeste de la playa, partiendo desde el Restaurante Balneario de la Magdalena, es una zona donde no se dispone de muchos datos, ya que solamente se tienen

datos hasta la Punta de San Marcos. Esta zona se encuentra en erosión, debido principalmente al transporte de la arena hacia el sur de la playa, perdiéndose posteriormente en la Bahía de Santander, y el transporte de la arena hacia el dique, debido a la influencia sobre el oleaje del mismo.

Por lo tanto, en caso de no llevar a cabo ninguna actuación antrópica, la zona oeste de la Playa de la Magdalena continuará erosionándose, mientras que en la parte este de la playa, se dispondrá de arena en la zona cercana al dique construido, ya que es una zona totalmente protegida. Es necesario el dique que se pretendía construir en el Muelle del Promontorio, el cual sirve de apoyo a la playa para que la arena no se pierda, y así obtener un sistema en equilibrio.

Así, el análisis de la evolución morfológica de la Playa de la Magdalena que se ha llevado a cabo, mediante imágenes, lo cual otorga una gran libertad a la hora de hacer estudios en distintas playas.

6. CONCLUSIONES GENERALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.1. CONCLUSIONES GENERALES DEL ESTUDIO

En el presente capítulo, se presentan las conclusiones obtenidas en base al estudio, y las futuras líneas de investigación derivadas del mismo.

En el presente estudio, se ha desarrollado una metodología de obtención de la batimetría. Esta metodología ha sido implementada, calibrada y validada en la Playa de la Magdalena, con buenos resultados en la parte intermareal, disponiendo de un error cuadrático medio de alrededor de 10 centímetros. Mediante la misma, ha sido posible llevar a cabo el análisis de la evolución morfológica de la Playa de la Magdalena durante el periodo 2018-2019. Se concluye, por lo tanto, que es una herramienta válida que se puede aplicar en distintas playas.

Cabe destacar el desarrollo del modelo batimétrico llevado a cabo en el estudio, cuyos resultados han sido adecuados, y se ha demostrado el potencial del mismo. En la cámara 1 se ha mostrado un error de alrededor de 10 centímetros a la hora de estimar la batimetría a un metro de profundidad (recordar que este resultado se ha obtenido en la autovalidación del modelo). Se ha demostrado, por lo tanto, que las hipótesis planteadas inicialmente eran adecuadas, y es necesario mencionar que el segundo modo espacial de los EOFs contiene parcialmente información de la batimetría sumergida. El modelo dispone de ciertas limitaciones, por ejemplo, la orientación de la cámara, la distancia hacia el objetivo, la iluminación en la imagen, la turbidez del agua etc. Las respuestas a estas limitaciones se darán en el siguiente apartado.

Respecto a la evolución morfológica de la Playa de la Magdalena, se ha llevado a cabo en el periodo entre 2018 y 2019, el cual se corresponde al periodo en el cual se llevaron a cabo las obras, y al periodo posterior en el cual la playa evolucionó naturalmente. En dicho periodo, se ha podido apreciar como la playa se ha ido estabilizando en la situación posterior a las obras, adoptando una forma en planta y un perfil distintos a los mostrados inicialmente, avanzando progresivamente en la parte cercana al dique, y retrocediendo en la parte oeste de la playa.

La obtención de las tasas de transporte, la evolución de la línea de costa y la variación del volumen a partir de imágenes ha mostrado ser suficiente para analizar el comportamiento de la Playa de la Magdalena mediante la implementación de la metodología desarrollada.

6.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Respecto a las líneas futuras de investigación y mejoras propuestas, asociadas a las conclusiones descritas y a toda la información mostrada a lo largo del estudio, estas se van a mostrar una a una.

La metodología propuesta ha demostrado ser suficientemente correcta para obtener la batimetría intermareal y submareal en ambas cámaras. Sin embargo, para mejorar los resultados obtenidos en la batimetría submareal, surgen dos ideas:

- Incluir un nuevo parámetro en el modelo batimétrico. Este parámetro es un parámetro asociado a la distancia del objetivo frente a la cámara. Definiendo el píxel de la imagen

más cercano a la posición geográfica a la cámara, y calculando la distancia (D) en píxeles hasta cada píxel de la imagen, otorgaría una matriz D con 0 en la posición del píxel más cercano a la cámara que se ha definido previamente y círculos concéntricos de mayor distancia a medida que nos alejamos de este. La matriz es constante y es la misma para todas las imágenes, por lo que las variaciones de turbidez y refracción de la luz en el agua las absorbería un coeficiente γ . Este parámetro se añadiría a la ecuación definida en la metodología:

$$Z_m = \alpha * U_2 + \beta * I_g + \gamma * D + Z_0$$

Y la idea principal sería ajustar dicho parámetro γ mediante un ajuste lineal al igual que se ha llevado a cabo con los demás parámetros.

- Discretizar la imagen horizontalmente para disponer de zonas con un error similar a lo largo de toda la playa. Ya que como se ha podido observar, la distancia del objetivo respecto a la cámara afecta a los resultados, por lo que discretizando se pueden obtener zonas con errores similares, y, por lo tanto, aplicar la metodología propuesta en cada zona dividida, obteniendo para cada una de ellas sus parámetros específicos.

Por otro lado, uno de los objetivos principales de esta área de investigación se basa en obtener las batimetrías mediante un proceso totalmente automático que no precise de supervisión humana.

La obtención de la batimetría intermareal es relativamente automática, el único proceso que necesita supervisión es el ajuste de la línea de costa en ciertas imágenes. Para poder disponer de un proceso totalmente automático, se propone el ajuste automático del segundo modo espacial relacionándolo con el porcentaje de agua del cual se dispone en la imagen, cuya relación variará con cada cámara.

Para automatizar el proceso de obtención de la batimetría submareal, y a su vez, mejorar el ajuste que se ha llevado a cabo en el parámetro α (el cual no ha quedado claro que sea un ajuste idóneo), se propone el uso de sistemas de redes neuronales, tal y como se explica en el artículo de Benschila *et al.*, 2020. El proceso se basa en “entrenar” las redes neuronales inicialmente, con series de parámetros α de cada día correspondiente, para que se pueda llevar a cabo sin supervisión alguna.

A su vez, también se pretende de poder estimar una profundidad mayor de la batimetría submareal en las imágenes, admitiendo errores constantes en cada una de ellas, y disponiendo de diferentes batimetrías estimadas para un mismo día con un error distinto, como es evidente, cuanto mayor sea la profundidad mayor será el error. Además, se propone añadir intervalos de confianza a los ajustes llevados a cabo, nuevamente para aumentar la profundidad de estimación.

Finalmente, teniendo una batimetría diaria, podemos ser capaces de crear un modelo empírico a corto plazo en relación a los oleajes incidentes (hindcast), además, ya se está pudiendo predecir el oleaje hasta 10 días (COPERNICUS), por lo que se podrían predecir las batimetrías futuras, y, por lo tanto, corrientes de retorno etc.

BIBLIOGRAFÍA

Asla Torralbo, J. (2015) *Proyecto de los diques y espigones propuestos para la estabilización de la playa de La Magdalena, Santander, Cantabria*.

Benshila, R. *et al.* (2020) 'A Deep Learning Approach for Estimation of the Nearshore Bathymetry', *Journal of Coastal Research*, 95(sp1), pp. 1011–1015. doi: 10.2112/SI95-197.1.

Bergsma, E. W. J. *et al.* (2016) 'Video-based nearshore bathymetry estimation in macro-tidal environments', *Marine Geology*. Elsevier B.V., 374, pp. 31–41. doi: 10.1016/j.margeo.2016.02.001.

Colombo, L. and Lafuente, R. (2012) 'El uso de la descomposición en valores singulares para el tratamiento de imágenes', *Matemática*, 7(diciembre 2011), pp. 1–14. Available at: <http://www.matematicalia.net/articulos/v7n4dic2011/lcolombo.pdf>.

Echenique Santisteban, A. (2016) *Detección De Líneas De Costa a Partir De Imágenes Digitales De Playas Por Medio De Funciones Empíricas Ortogonales Y Su Aplicación En Las Playas Del Puntal Y Sardinero*.

Instituto Nacional de Estadística (23 de Diciembre de 2019). Nota de prensa. https://www.ine.es/prensa/cst_2018.pdf. [Acceso: 2-7-2019]

Osorio, A. F., Medina, R. and Gonzalez, M. (2012) 'An algorithm for the measurement of shoreline and intertidal beach profiles using video imagery: PSDM', *Computers and Geosciences*. Elsevier, 46, pp. 196–207. doi: 10.1016/j.cageo.2011.12.008.

Osorio Arias, A. (2005) *Desarrollo de técnicas y metodologías basadas en basadas en sistemas de video para la gestión de la costa*.

ANEXOS

A.I. FUNCIONES EMPÍRICAS ORTOGONALES (EOFs)

En este primer anejo se explica como aplicar las Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs) a imágenes, para obtener información sobre la posición de la línea de costa. La información mostrada a continuación esa basada en el estudio de Echenique Santisteban, 2016, en el cual se lleva a cabo la aplicación de los EOFs a imágenes mediante la Descomposición en Valores Singulares, y Colombo and Lafuente, 2012, que llevan a cabo la Descomposición en Valores Singulares.

A.I.1 INTRODUCCIÓN

Las funciones empíricas ortogonales, también conocidas como autofunciones, son una herramienta matemática empleada generalmente en un contexto de análisis de variabilidad espacio-temporal asociada a distintos fenómenos físicos.

Han sido utilizadas principalmente en oceanografía, meteorología y climatología para llevar a cabo estudios de precipitación, temperatura o fenómenos climatológicos como, por ejemplo, El Niño.

Su aplicación a imágenes, ha sido llevada a cabo en imágenes satelitales, con distintos usos, por ejemplo, estudiar perfiles transversales de playas, contenidos atmosféricos de ciertas sustancias, caracterización de superficies...

Se va a llevar a cabo la descripción de las Funciones Empíricas Ortogonales, junto a su aplicación a imágenes para la detección de la línea de costa.

A.I.2 DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA

Las funciones empíricas ortogonales son una descomposición de una señal o conjunto de datos en términos de ortogonales funciones de base determinados a partir de datos. Son utilizadas para resolver un sistema de ecuaciones lineales sujetas a unas determinadas condiciones de contorno, cuya solución existe solo para determinados valores, denominados autovalores.

Son capaces de analizar tanto la variabilidad espacial como temporal de un campo geofísico, encontrando las componentes principales de variabilidad y tiempo de variación, otorgando una idea de la importancia de cada componente. La información debe expresarse de forma matricial, puesto que se trata de un método matricial.

Disponiendo de series temporales de datos en las posiciones x_1, x_2, \dots, x_p para los tiempos t_1, t_2, \dots, t_n , para cada tiempo t_j ($j=1, \dots, n$), se puede suponer a las mediciones x_i ($i=1, \dots, p$) como un mapa o campo.

Estas mediciones se almacenan en una matriz F como n mapas, siendo cada mapa de longitud p , y se organiza cada mapa como una fila en la matriz, obteniendo una matriz F de $n \times p$.

$$F = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix}$$

Cada columna p se puede interpretar como una serie de tiempo para una localización dada, mientras que cada fila n se puede interpretar como una serie de localizaciones para un instante dado.

El análisis de las Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs) se lleva a cabo utilizando F como matriz de datos.

Para obtener las EOFs, se forma la matriz de covarianza de F como $R = F^t F$ y se resuelve el problema de los valores propios.

$$RC = C\Lambda$$

Siendo Λ la matriz diagonal que contiene los valores principales λ_i de la matriz R ; y C es una matriz ortogonal, de forma que R se puede escribir como:

$$R = C\Lambda C^t$$

Las matrices C y Λ poseen las dimensiones $n \times p$.

Las columnas c_i de C son los autovectores de R correspondientes a los autovalores λ_i , es decir, para cada valor propio λ_i hay un autovector c_i .

Estos autovectores son las EOFs que se buscaban (modos espaciales), y se ordenan en función del tamaño del valor propio, por lo tanto, la primera EOF estará asociada al mayor autovalor, la segunda EOF al segundo mayor autovalor, y así sucesivamente. Cada autovalor λ_i representa la proporción de la varianza total de la matriz F .

Como se ha mencionado anteriormente, la matriz C es una matriz ortogonal, además, tiene la propiedad de que $C^t C = C C^t = I$, por lo que las EOFs son independientes en el espacio y los autovectores ortogonales entre ellos.

Los autovalores y autovectores cumplen las siguientes propiedades:

- Los autovalores de una matriz real simétrica son todos reales.
- Dos autovectores asociados a dos autovalores distintos son ortogonales.
- Una matriz real simétrica de dimensiones $n \times n$ tiene n autovectores independientes.
- Si la matriz además de simétrica y real es definida positiva, entonces sus autovalores son todos positivos.

El patrón obtenido cuando un modo empírico (EOF) es pintado como un mapa, representa una oscilación estacionaria. La evolución en el tiempo de un EOF muestra como dicho patrón oscila en el tiempo. La evolución del modo empírico se calcula:

$$\vec{a}_1 = F \vec{c}_1$$

Por lo tanto, la n -ésima componente del vector a_1 son las proyecciones de los mapas en F del primer EOF, y el vector es la serie temporal de evolución de dicho EOF. Ya que los EOFs no están correlacionados en el espacio, los coeficientes de expansión tampoco están correlacionados en el tiempo.

Un modo empírico se puede reconstruir con:

$$F = \sum_{j=1}^p \vec{a}_j (EOF_j)$$

Como se ha mencionado anteriormente, los primeros N autovectores (valores mayores) recogen el comportamiento dinámico del sistema (mayor variabilidad), y el resto de autovectores (valores menores) son “ruido”, es decir, variabilidad aleatoria. Por lo tanto, se pueden emplear las EOF para reconstruir la serie de datos con los autovalores mayores, obteniendo una versión limpia con las componentes de mayor variabilidad y más representativas de la serie.

Concluyendo, el procedimiento para obtener las Funciones Empíricas Ortogonales es el siguiente:

- Construir la matriz F .
- Calcular la matriz de covarianza $\rightarrow R = F^t F$.
- Resolver el sistema $R = C \Lambda C^t$, obteniendo los autovectores y autovalores.
- Calcular las componentes principales $\rightarrow \vec{a}_j = F * (EOF_j)$

A continuación, se va a explicar otro método utilizado para obtener las Funciones Empíricas Ortogonales, el cual es la Descomposición de Valores Singulares.

A.1.3 TEORÍA DE LA DESCOMPOSICIÓN DE VALORES SINGULARES

Los valores singulares de una matriz $F \in R^{m \times n}$ se definen como las raíces cuadradas no negativas de los autovalores de una matriz simétrica $F^t F \in R^{n \times n}$, que siempre es definida no negativa (o semidefinida positiva). Estos se ordenan en sentido decreciente:

$$\sigma_1(F) \geq \sigma_2(F) \geq \dots \geq \sigma_p(F) \geq 0$$

Siendo $p = \min(m, n)$, y si el contexto lo permite, se omite la matriz F de su expresión y se denotan simplemente por:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_p \geq 0$$

Si $F \in R^{m \times n}$, con $m \geq n$, entonces existen matrices U, S, V tales que

$$F = USV^t$$

Donde U es una matriz $n \times n$ que satisface $U^t U = I$, es decir, ortonormal, V es una matriz ortonormal de $m \times m$ y S es una matriz diagonal de $m \times n$ con σ_n elementos en la diagonal ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n \geq 0$). Estos elementos son los denominados valores singulares, mientras que las columnas de las matrices U y V contienen los vectores singulares de F .

Si $r = \text{rg}F$, y $r < n$, se obtendrán $n - r$ valores singulares nulos.

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > \sigma_{r+1} = \dots = \sigma_n = 0$$

Para obtener la relación entre la Descomposición en Valores Singulares y las Funciones Empíricas Ortogonales, se considera F como la matriz de datos, eliminada ya la media, y la matriz covarianza R definida como $R = F^t F$.

Del método anterior se dedujo:

$$R = C \Lambda C^t$$

Pero si primero se realiza la Descomposición en Valores Singulares en F , y después se forma la matriz de covarianza:

$$F = USV^t$$

$$R = F^t F = (USV^t)^t (USV^t) = VS^t U^t USV^t = VS^t SV^t$$

Comparando las fórmulas de ambos métodos ($R = C\Lambda C^t$ y $R = VS^t SV^t$):

$$C = V; C^t = V^t; \Lambda = S^t S$$

La correlación entre los autovalores de R y los valores singulares de F es:

$$\lambda_i = \sigma_i^2$$

Los autovectores de $R = F^t F$ son los vectores columna de V .

Por lo tanto, las Funciones Empíricas Ortogonales se pueden calcular a partir de la Descomposición en valores Singulares y es el método empleado en el presente estudio.

A.I.4 APLICACIÓN A IMÁGENES DIGITALES DE PLAYAS

Introducción

Una imagen digital está compuesta por $m \times n$ píxeles, y cada uno contiene información del color de dicha parte de la imagen. Estos píxeles son representados en coordenadas de imagen (u,v), y cada combinación de dichas coordenadas, almacenan colores primarios, es decir, rojo (R), verde (G) y azul (B). Por lo tanto, una imagen puede representarse mediante una matriz de $m \times n \times k$, siendo m y n las filas y columnas de la imagen (representadas como píxeles) y k los canales RGB. El color rojo se asocia a la primera capa ($k=1$), el color verde a la segunda ($k=2$) y el color azul a la tercera ($k=3$), donde cada una de las capas tiene unas dimensiones $m \times n$.

Aplicación a imágenes

La aplicación de la Descomposición en Valores Singulares (SVD) a imágenes y la posterior detección de la línea de costa en base a esta descomposición se lleva a cabo mediante los procesos que se describen a continuación.

Para obtener las EOFs de las imágenes, se emplea el método de la Descomposición en Valores Singulares, la cual es una técnica general de descomposición matricial, por lo que es necesario disponer de las imágenes con estructura matricial $m \times n$.

Como se ha mencionado anteriormente, una imagen se puede expresar mediante una matriz de tres capas (RGB), pero para poder aplicar la Descomposición en Valores Singulares, es necesaria una matriz de una sola capa, por lo que las matrices de cada color se transforman en un vector columna y se juntan en una sola matriz, en la cual se aplica el método SVD, obteniendo los modos espaciales, temporales y los valores singulares de cada imagen. Véase la figura A.I.1.

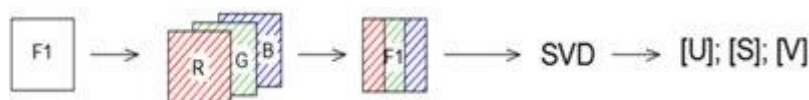


Figura A.I. 1: Esquema de la obtención de los modos de una imagen.

Los modos espaciales son representados por la matriz $U(n \times n)$, mientras que las matrices $V(m \times m)$ y $S(m \times n)$, representan los modos temporales y los valores singulares respectivamente.

Así, se obtienen los tres modos espaciales (U_1, U_2, U_3) de cada imagen (son 3 debido a las tres columnas que componen la matriz en la que se ha aplicado la descomposición), cada modo espacial es una matriz de $m \times n$, con valores de U_1, U_2 y U_3 en cada una de ellas, y se explican a continuación:

- Modo espacial 1, U_1 . Este modo representa un nivel de referencia, es decir, lo que es común en los tres canales RGB. Por lo tanto, el modo espacial 1 detecta las estructuras comunes o fijas.
- Modo espacial 2, U_2 . Este modo representa la variabilidad máxima de la imagen, por tanto, indica como varían los elementos de la imagen respecto al nivel de referencia (modo espacial 1). Por lo tanto, el modo espacial 2 detecta elementos de gran variabilidad como la línea de costa.
- Modo espacial 3, U_3 . Este modo representa la variabilidad de menor escala, a la que se le puede denominar “ruido”. No se distinguen patrones relevantes, por lo que no aporta información en concreto.

El modo espacial relevante para el presente estudio es el modo espacial 2 (U_2), puesto que aporta información sobre la línea de costa, y es el que otorga el IHOLLin.

Un ejemplo de la información aportada por el segundo modo espacial se muestra en la figura AI.2, donde quedan representados los contornos del mismo, asociados a valores de U_2 constantes.



Figura AI. 2: Imagen capturada mediante la cámara 1 el 15 de marzo de 2019, donde el contorno de U_2 queda representado mediante líneas negras.

A.II. ESTIMACIONES DE LA BATIMETRÍA DEL 29 DE SEPTIEMBRE DE 2019

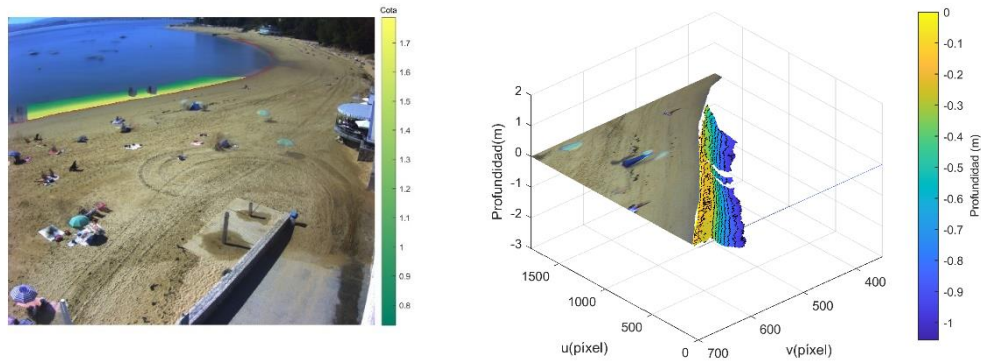


Figura AII. 1: Estimación del modelo batimétrico en la imagen de la cámara 1 correspondiente a las 11:29 el 29 de septiembre de 2019, con un nivel del mar de 1.787m. A la izquierda imagen 2D con batimetría referida al 0 del Puerto de Santander, a la derecha imagen en 3D con batimetría referida al nivel del mar en dicha imagen.

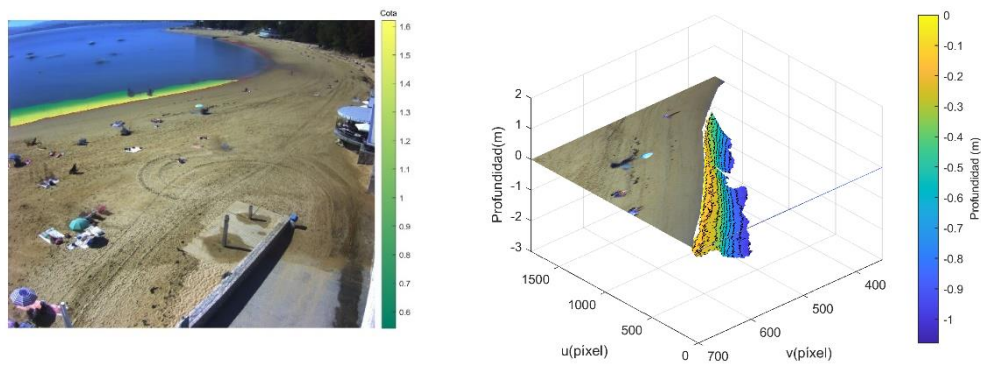


Figura AII. 2: Estimación del modelo batimétrico en la imagen de la cámara 1 correspondiente a las 11:19 el 29 de septiembre de 2019, con un nivel del mar de 1.621m. A la izquierda imagen 2D con batimetría referida al 0 del Puerto de Santander, a la derecha imagen en 3D con batimetría referida al nivel del mar en dicha imagen.

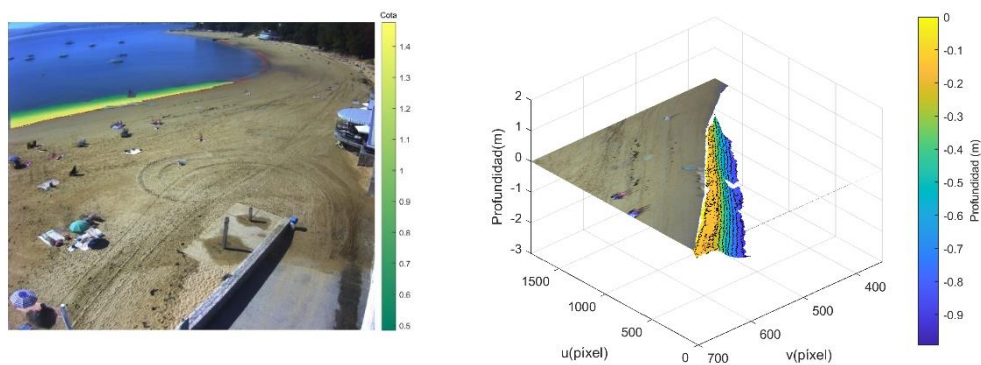


Figura AII. 3: Estimación del modelo batimétrico en la imagen de la cámara 1 correspondiente a las 11:09 el 29 de septiembre de 2019, con un nivel del mar de 1.477m. A la izquierda imagen 2D con batimetría referida al 0 del Puerto de Santander, a la derecha imagen en 3D con batimetría referida al nivel del mar en dicha imagen.

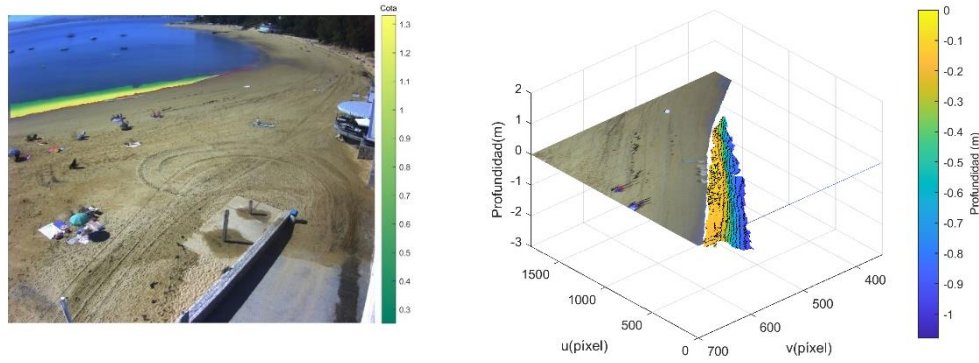


Figura All. 4: Estimación del modelo batimétrico en la imagen de la cámara 1 correspondiente a las 10:59 el 29 de septiembre de 2019, con un nivel del mar de 1.333m. A la izquierda imagen 2D con batimetría referida al 0 del Puerto de Santander, a la derecha imagen en 3D con batimetría referida al nivel del mar en dicha imagen.

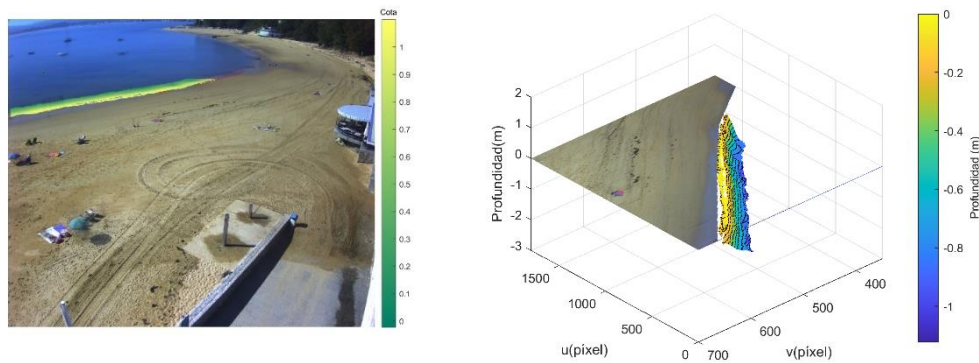


Figura All. 5: Estimación del modelo batimétrico en la imagen de la cámara 1 correspondiente a las 10:39 el 29 de septiembre de 2019, con un nivel del mar de 1.1m. A la izquierda imagen 2D con batimetría referida al 0 del Puerto de Santander, a la derecha imagen en 3D con batimetría referida al nivel del mar en dicha imagen.

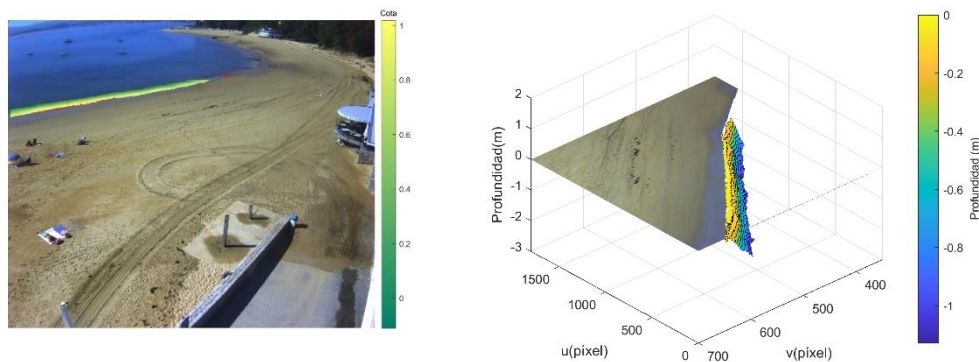


Figura All. 6: Estimación del modelo batimétrico en la imagen de la cámara 1 correspondiente a las 10:29 el 29 de septiembre de 2019, con un nivel del mar de 1.018m. A la izquierda imagen 2D con batimetría referida al 0 del Puerto de Santander, a la derecha imagen en 3D con batimetría referida al nivel del mar en dicha imagen.

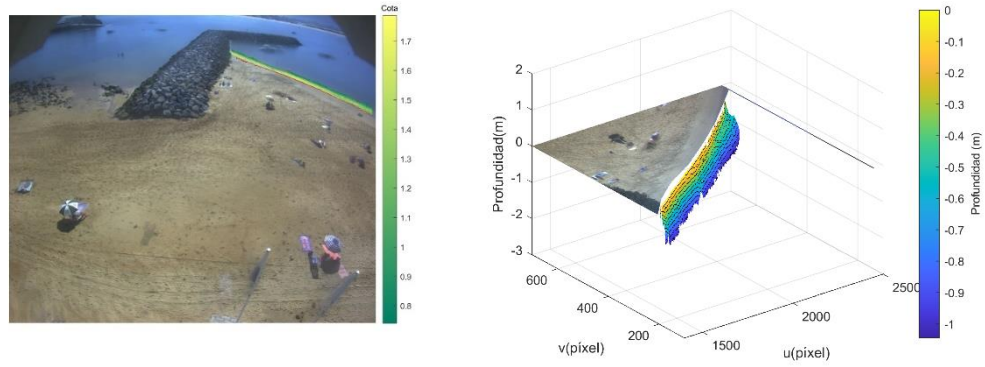


Figura All. 7: Estimación del modelo batimétrico en la imagen de la cámara 2 correspondiente a las 11:29 el 29 de septiembre de 2019, con un nivel del mar de 1.787m. A la izquierda imagen 2D con batimetría referida al 0 del Puerto de Santander, a la derecha imagen en 3D con batimetría referida al nivel del mar en dicha imagen.

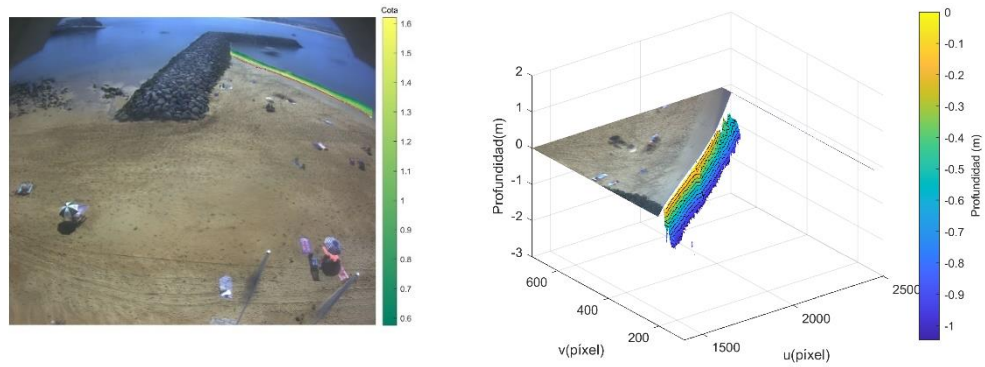


Figura All. 8: Estimación del modelo batimétrico en la imagen de la cámara 2 correspondiente a las 11:19 el 29 de septiembre de 2019, con un nivel del mar de 1.621m. A la izquierda imagen 2D con batimetría referida al 0 del Puerto de Santander, a la derecha imagen en 3D con batimetría referida al nivel del mar en dicha imagen.

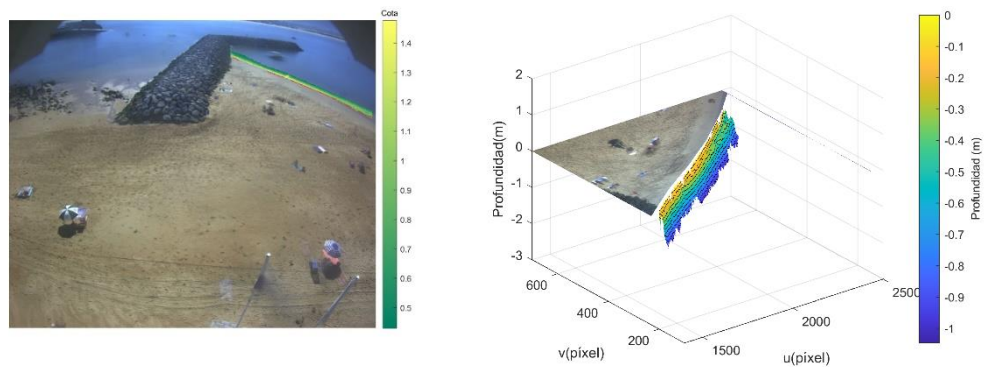


Figura All. 9: Estimación del modelo batimétrico en la imagen de la cámara 2 correspondiente a las 11:09 el 29 de septiembre de 2019, con un nivel del mar de 1.477m. A la izquierda imagen 2D con batimetría referida al 0 del Puerto de Santander, a la derecha imagen en 3D con batimetría referida al nivel del mar en dicha imagen.

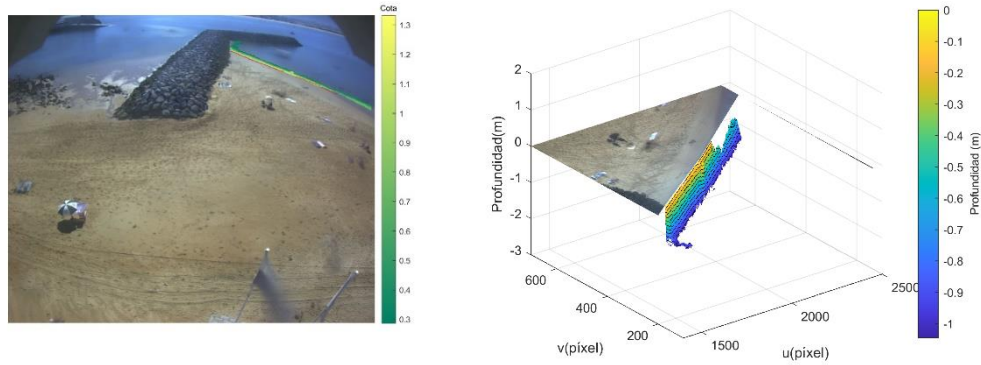


Figura AII. 10: Estimación del modelo batimétrico en la imagen de la cámara 2 correspondiente a las 10:59 el 29 de septiembre de 2019, con un nivel del mar de 1.333m. A la izquierda imagen 2D con batimetría referida al 0 del Puerto de Santander, a la derecha imagen en 3D con batimetría referida al nivel del mar en dicha imagen.

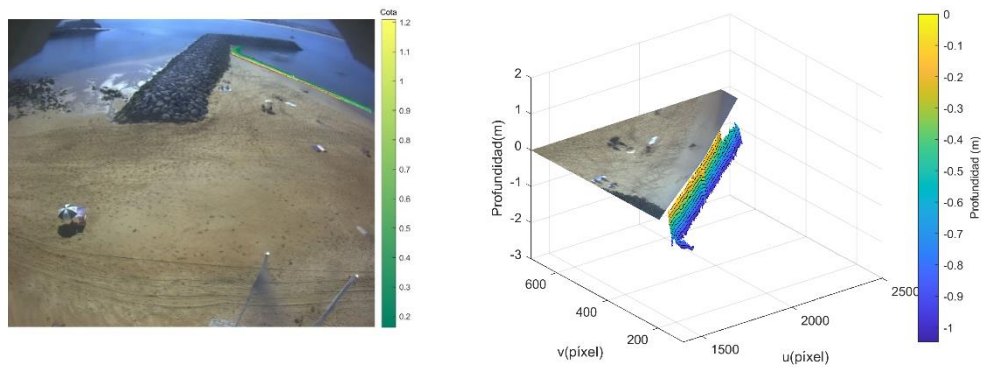


Figura AII. 11: Estimación del modelo batimétrico en la imagen de la cámara 2 correspondiente a las 10:49 el 29 de septiembre de 2019, con un nivel del mar de 1.209m. A la izquierda imagen 2D con batimetría referida al 0 del Puerto de Santander, a la derecha imagen en 3D con batimetría referida al nivel del mar en dicha imagen.

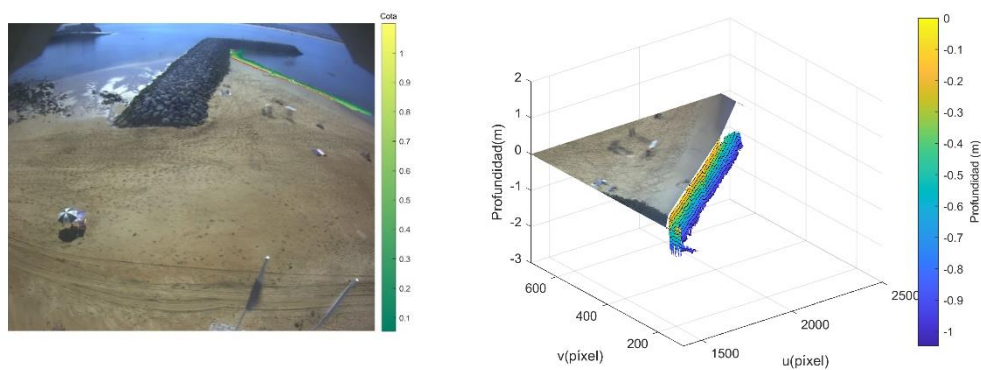


Figura AII. 12: Estimación del modelo batimétrico en la imagen de la cámara 2 correspondiente a las 10:39 el 29 de septiembre de 2019, con un nivel del mar de 1.1m. A la izquierda imagen 2D con batimetría referida al 0 del Puerto de Santander, a la derecha imagen en 3D con batimetría referida al nivel del mar en dicha imagen.

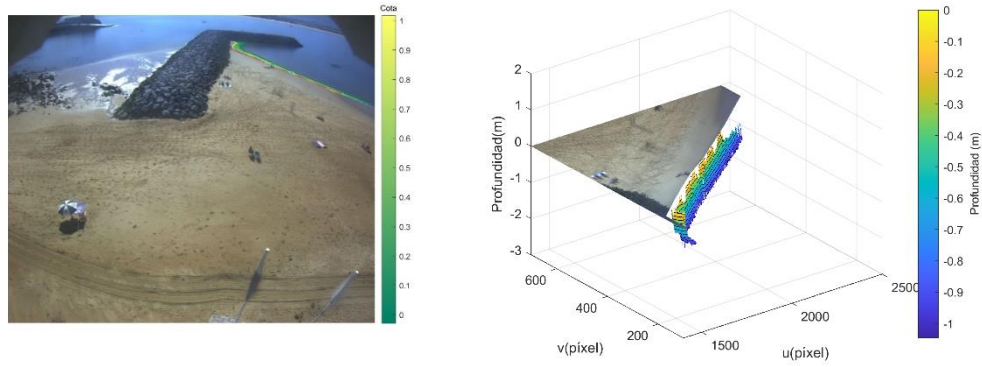


Figura All. 13: Estimación del modelo batimétrico en la imagen de la cámara 2 correspondiente a las 10:29 el 29 de septiembre de 2019, con un nivel del mar de 1.018m. A la izquierda imagen 2D con batimetría referida al 0 del Puerto de Santander, a la derecha imagen en 3D con batimetría referida al nivel del mar en dicha imagen.

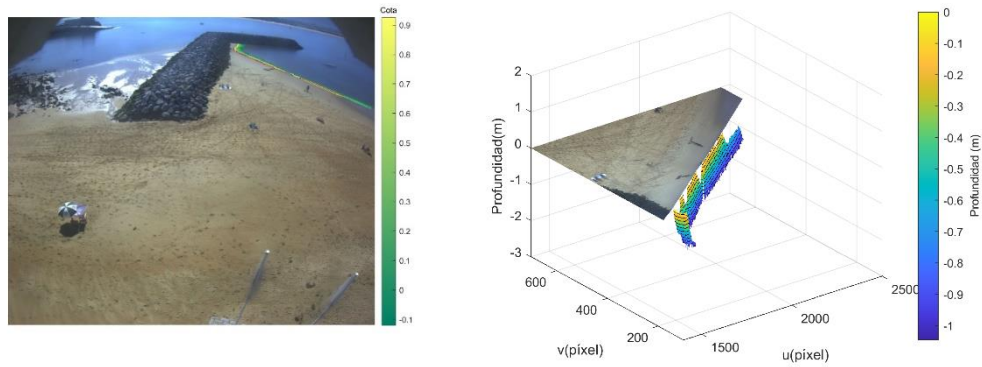


Figura All. 14: Estimación del modelo batimétrico en la imagen de la cámara 2 correspondiente a las 10:19 el 29 de septiembre de 2019, con un nivel del mar de 0.926m. A la izquierda imagen 2D con batimetría referida al 0 del Puerto de Santander, a la derecha imagen en 3D con batimetría referida al nivel del mar en dicha imagen.

A.III. COHERENCIA DE LOS RESULTADOS DEL MODELO BATIMÉTRICO DEL 29 DE SEPTIEMBRE DE 2019

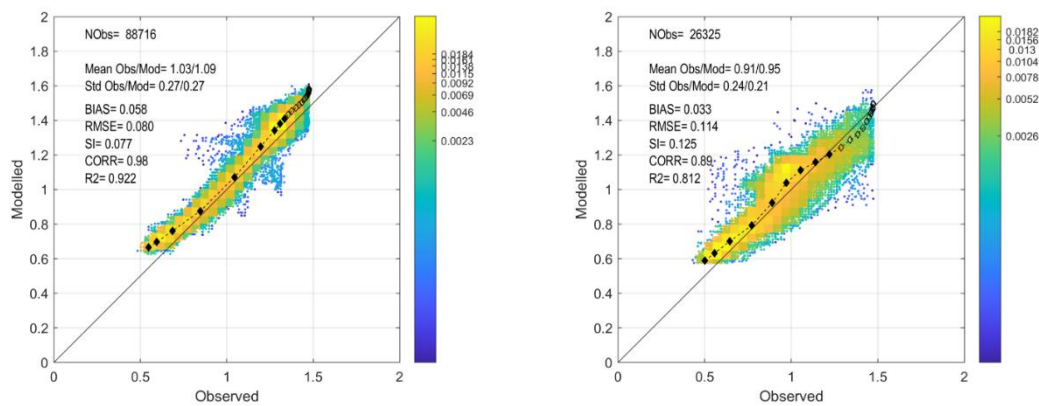


Figura A.III. 1: Gráfico de dispersión de probabilidad conjunta entre las batimetrías estimadas en las imágenes correspondientes a las 11:19 y 11:09, en la cámara 1 (izquierda) y la cámara 2 (derecha).

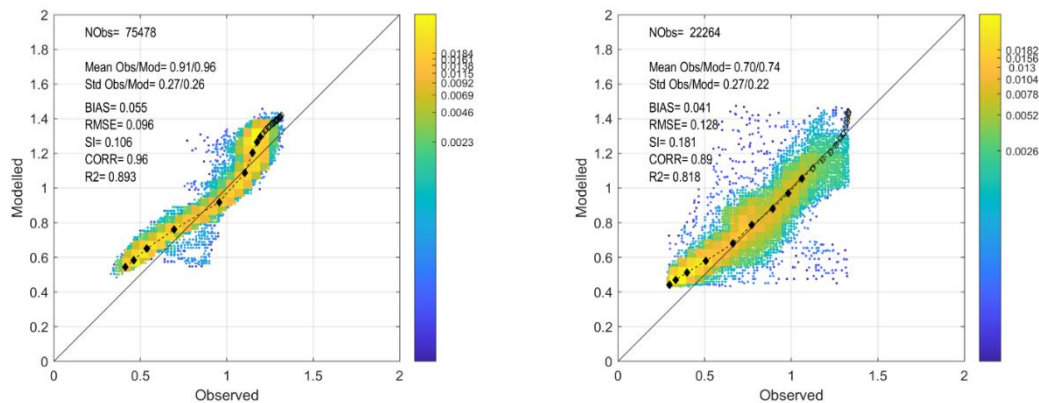


Figura A.III. 2: Gráfico de dispersión de probabilidad conjunta entre las batimetrías estimadas en las imágenes correspondientes a las 11:09 y 10:59, en la cámara 1 (izquierda) y la cámara 2 (derecha).

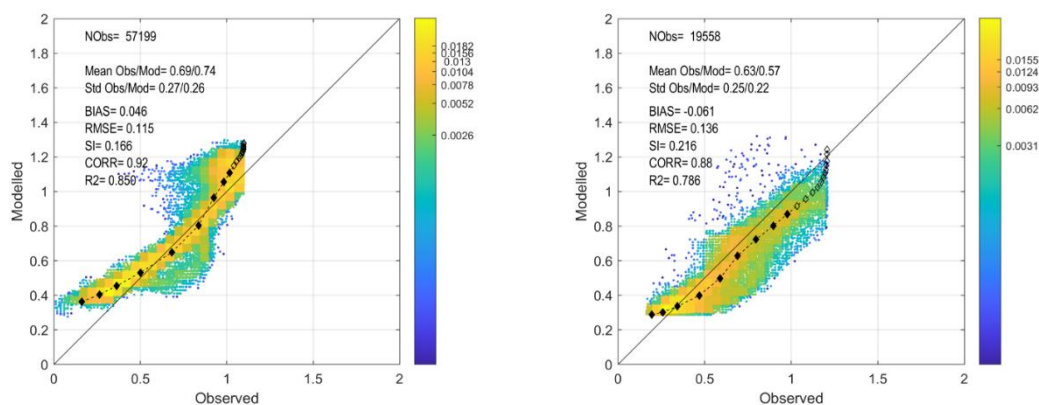


Figura A.III. 3: Gráfico de dispersión de probabilidad conjunta entre las batimetrías estimadas en las imágenes correspondientes a las 10:59 y 10:39, en la cámara 1 (izquierda). Gráfico de dispersión de probabilidad conjunta entre las batimetrías estimadas en las imágenes correspondientes a las 10:59 y 10:49, en la cámara 2 (derecha).

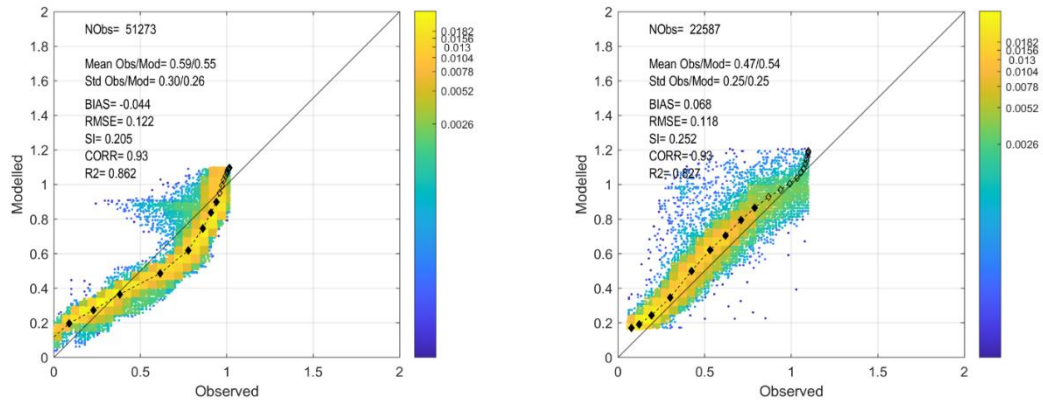


Figura AIII. 4: Gráfico de dispersión de probabilidad conjunta entre las batimetrías estimadas en las imágenes correspondientes a las 10:39 y 10:19, en la cámara 1 (izquierda). Gráfico de dispersión de probabilidad conjunta entre las batimetrías estimadas en las imágenes correspondientes a las 10:49 y 10:39, en la cámara 2 (derecha).

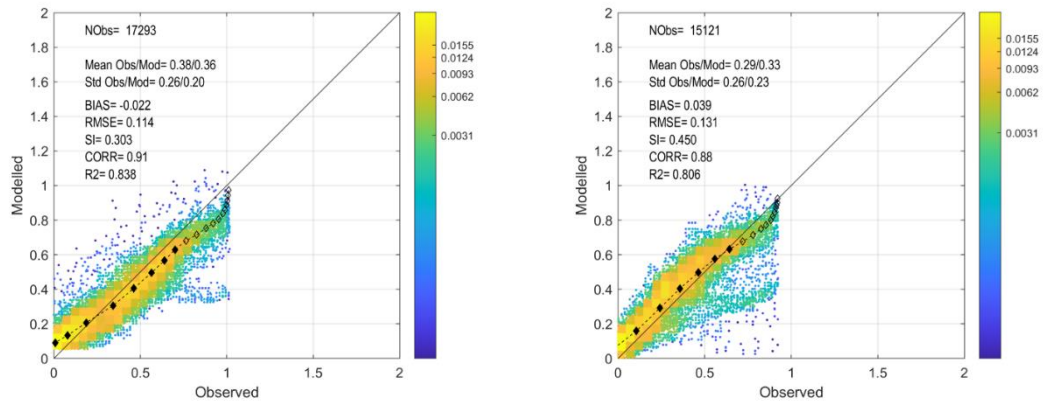


Figura AIII. 5: Gráfico de dispersión de probabilidad conjunta entre las batimetrías estimadas en las imágenes correspondientes a las 10:39 y 10:29 (izquierda), y a las 10:29 y 10:19 (derecha).

A.IV. VALIDACIÓN DEL MODELO BATIMÉTRICO DEL 29 DE SEPTIEMBRE DE 2019

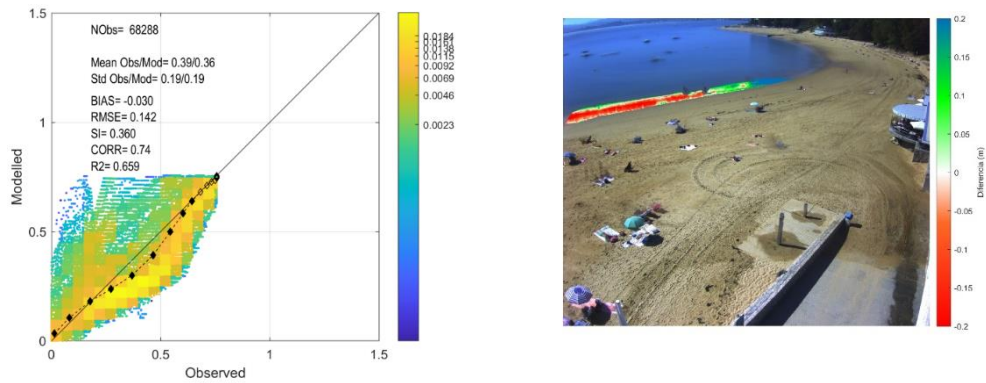


Figura AIV. 1: Comparación entre profundidad modelada y profundidad medida en la cámara 1, 11:19. A la izquierda gráfico de dispersión de probabilidad conjunta, a la derecha mapa de anomalías espaciales, donde el color rojo representa subestimación de la profundidad y el color azul sobreestimación de la profundidad por parte del modelo.

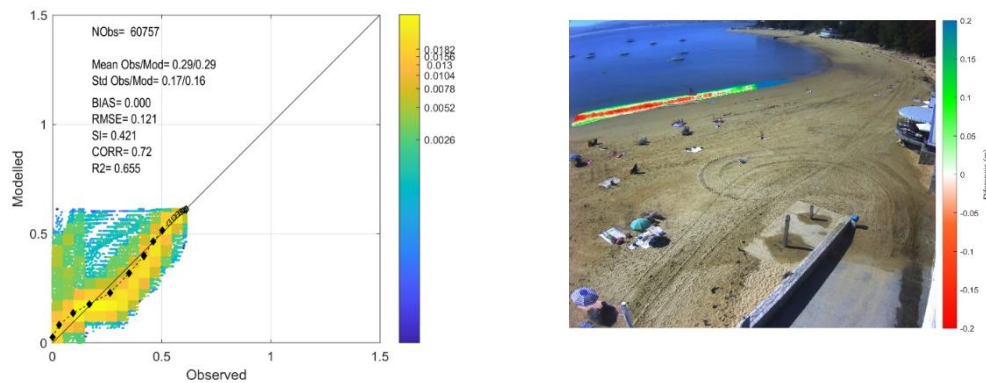


Figura AIV. 2: Comparación entre profundidad modelada y profundidad medida en la cámara 1, 11:09. A la izquierda gráfico de dispersión de probabilidad conjunta, a la derecha mapa de anomalías espaciales, donde el color rojo representa subestimación de la profundidad y el color azul sobreestimación de la profundidad por parte del modelo.

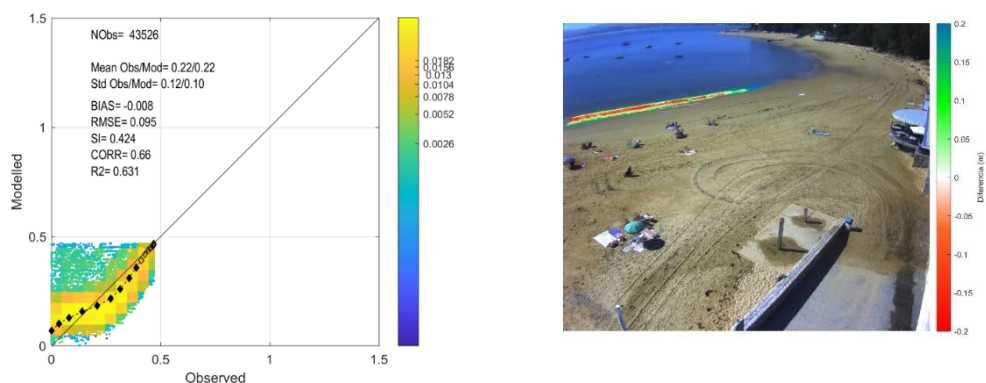


Figura AIV. 3: Comparación entre profundidad modelada y profundidad medida en la cámara 1, 10:59. A la izquierda gráfico de dispersión de probabilidad conjunta, a la derecha mapa de anomalías espaciales, donde el color rojo representa subestimación de la profundidad y el color azul sobreestimación de la profundidad por parte del modelo.

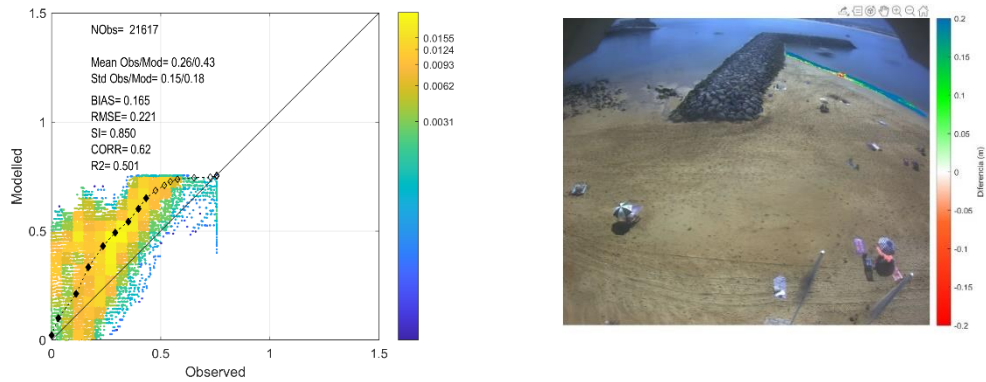


Figura AIV. 4: Comparación entre profundidad modelada y profundidad medida en la cámara 2, 11:19. A la izquierda gráfico de dispersión de probabilidad conjunta, a la derecha mapa de anomalías espaciales, donde el color rojo representa subestimación de la profundidad y el color azul sobreestimación de la profundidad por parte del modelo.

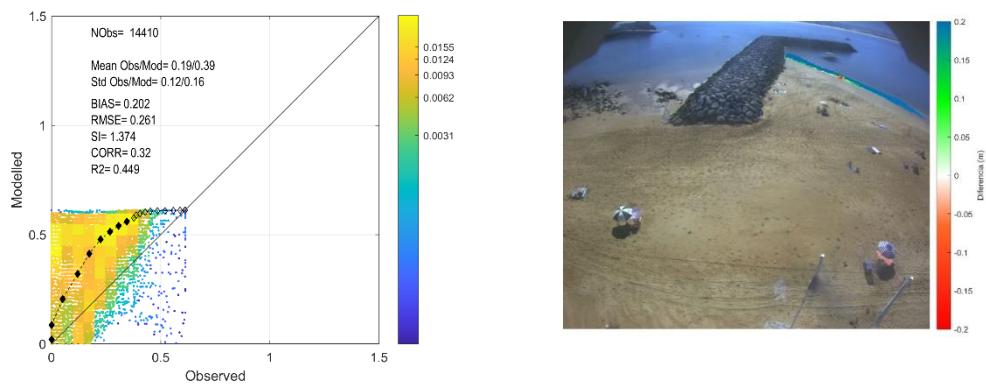


Figura AIV. 5: Comparación entre profundidad modelada y profundidad medida en la cámara 2, 11:09. A la izquierda gráfico de dispersión de probabilidad conjunta, a la derecha mapa de anomalías espaciales, donde el color rojo representa subestimación de la profundidad y el color azul sobreestimación de la profundidad por parte del modelo.

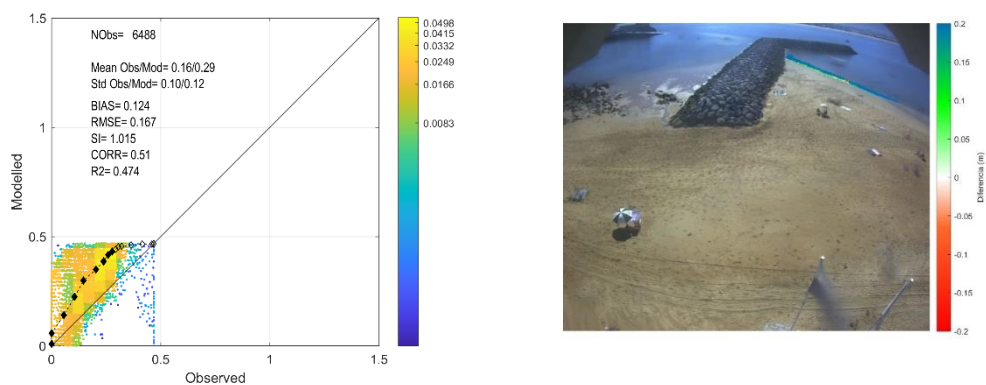


Figura AIV. 6: Comparación entre profundidad modelada y profundidad medida en la cámara 2, 10:59. A la izquierda gráfico de dispersión de probabilidad conjunta, a la derecha mapa de anomalías espaciales, donde el color rojo representa subestimación de la profundidad y el color azul sobreestimación de la profundidad por parte del modelo.

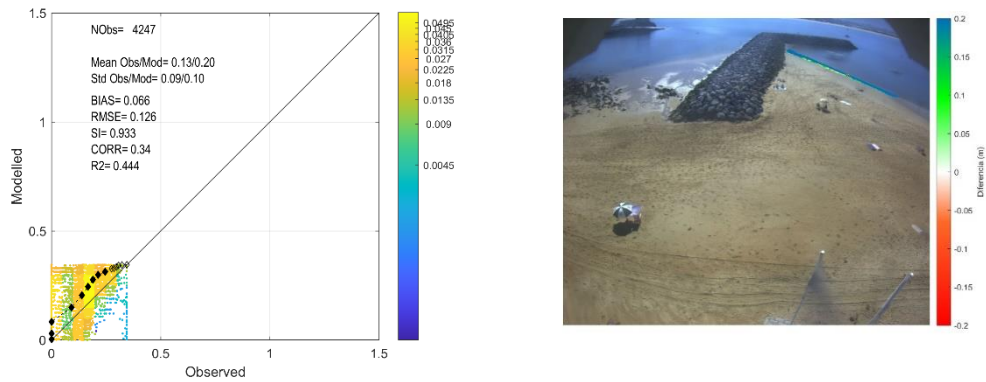


Figura AIV. 7: Comparación entre profundidad modelada y profundidad medida en la cámara 2, 10:49. A la izquierda gráfico de dispersión de probabilidad conjunta, a la derecha mapa de anomalías espaciales, donde el color rojo representa subestimación de la profundidad y el color azul sobreestimación de la profundidad por parte del modelo.

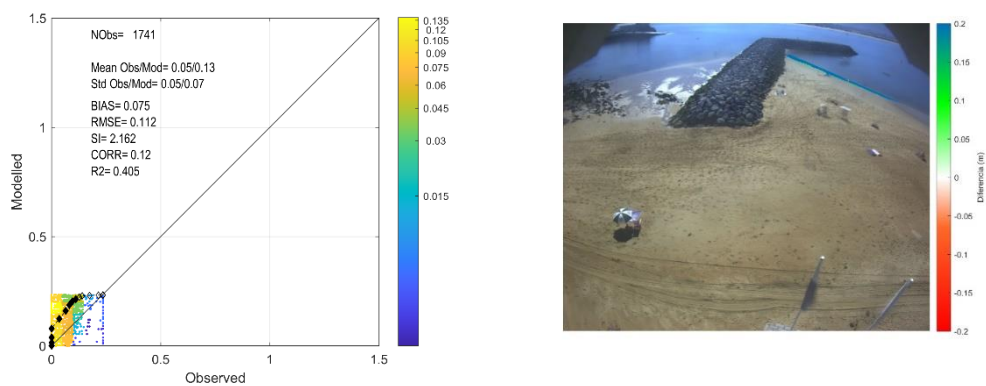


Figura AIV. 8: Comparación entre profundidad modelada y profundidad medida en la cámara 2, 10:39. A la izquierda gráfico de dispersión de probabilidad conjunta, a la derecha mapa de anomalías espaciales, donde el color rojo representa subestimación de la profundidad y el color azul sobreestimación de la profundidad por parte del modelo.

A.V. DETERMINACIÓN DE LAS BATIMETRÍAS PARA EL ANÁLISIS A LARGO PLAZO

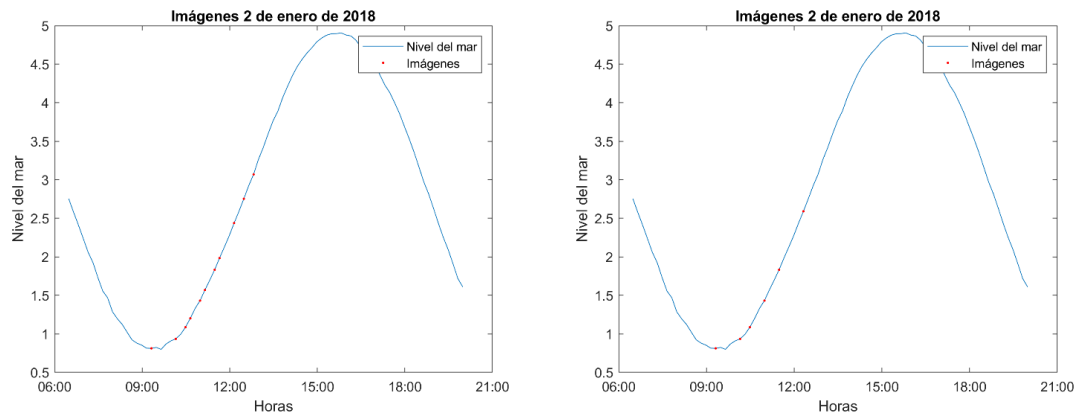


Figura AV. 1: Emparejamiento de las fechas de las imágenes seleccionadas de la cámara 1 (izquierda) y cámara 2 (derecha) con sus correspondientes niveles de mar el 2 de enero de 2018.

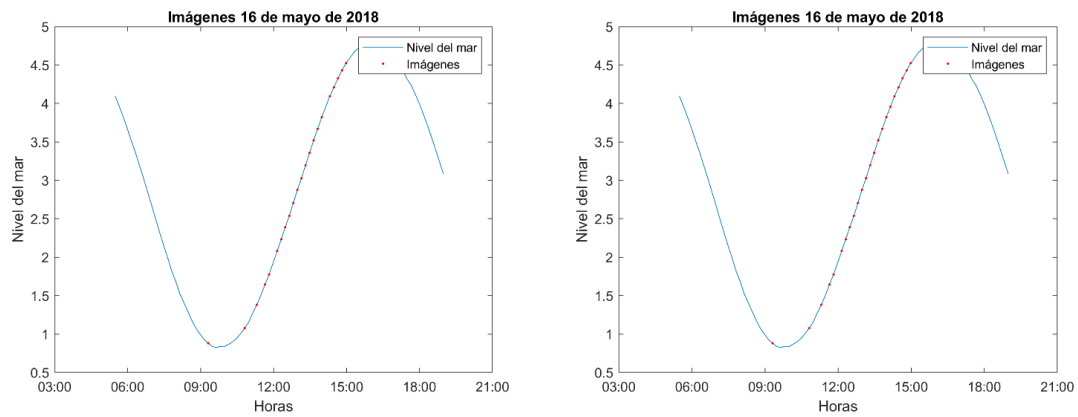


Figura AV. 2: Emparejamiento de las fechas de las imágenes seleccionadas de la cámara 1 (izquierda) y cámara 2 (derecha) con sus correspondientes niveles de mar el 16 de mayo de 2018.

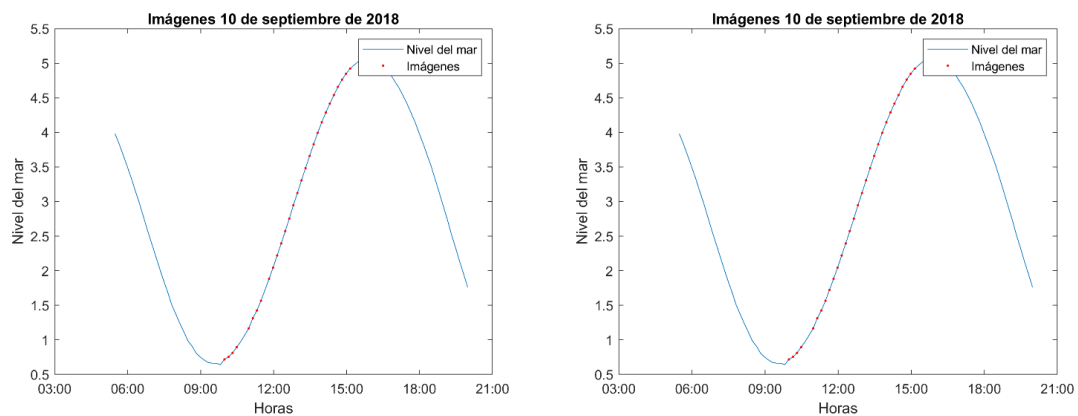


Figura AV. 3: Emparejamiento de las fechas de las imágenes seleccionadas de la cámara 1 (izquierda) y cámara 2 (derecha) con sus correspondientes niveles de mar el 10 de septiembre de 2018.

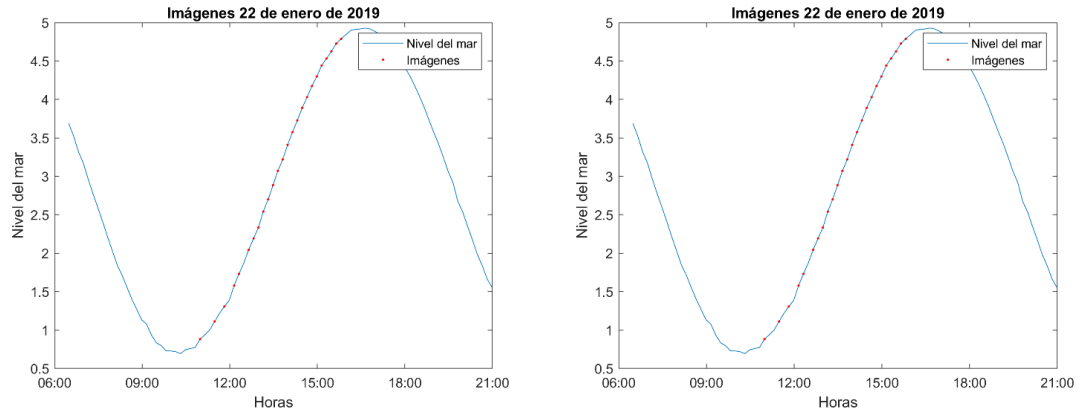


Figura AV. 4: Emparejamiento de las fechas de las imágenes seleccionadas de la cámara 1 (izquierda) y cámara 2 (derecha) con sus correspondientes niveles de mar el 22 de enero de 2019.

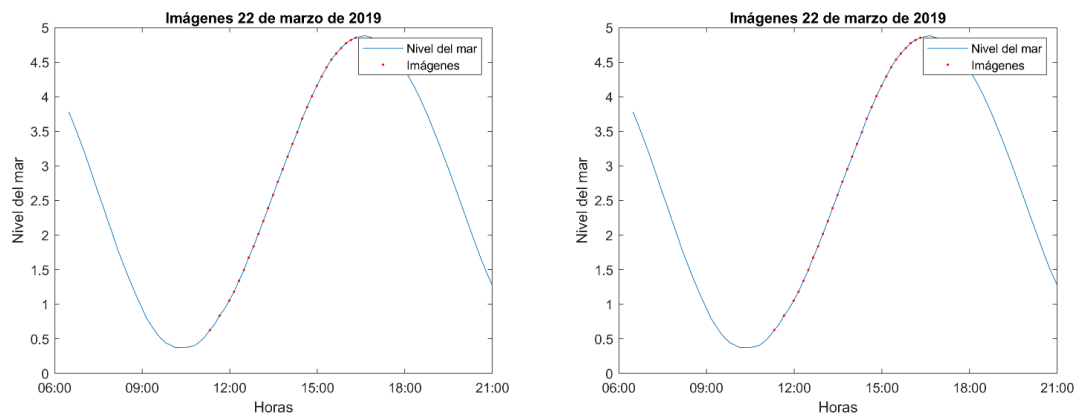


Figura AV. 5: Emparejamiento de las fechas de las imágenes seleccionadas de la cámara 1 (izquierda) y cámara 2 (derecha) con sus correspondientes niveles de mar el 22 de marzo de 2019.

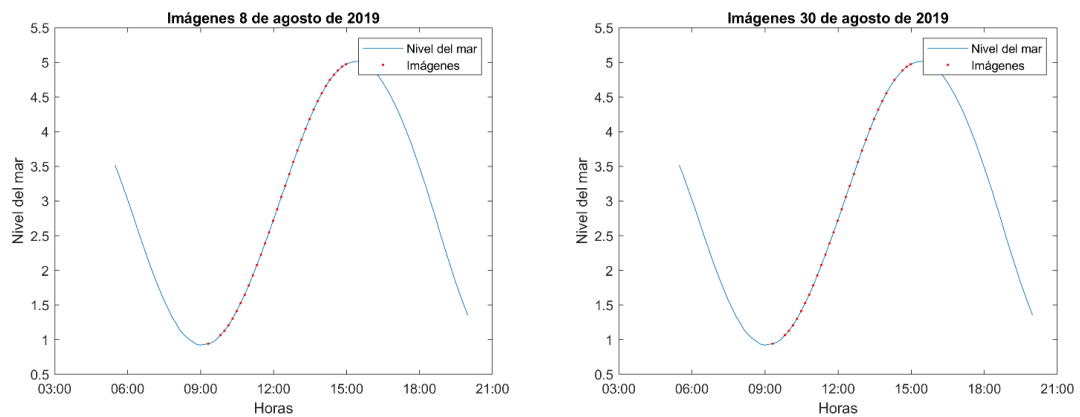


Figura AV. 6: Emparejamiento de las fechas de las imágenes seleccionadas de la cámara 1 (izquierda) y cámara 2 (derecha) con sus correspondientes niveles de mar el 30 de agosto de 2019.

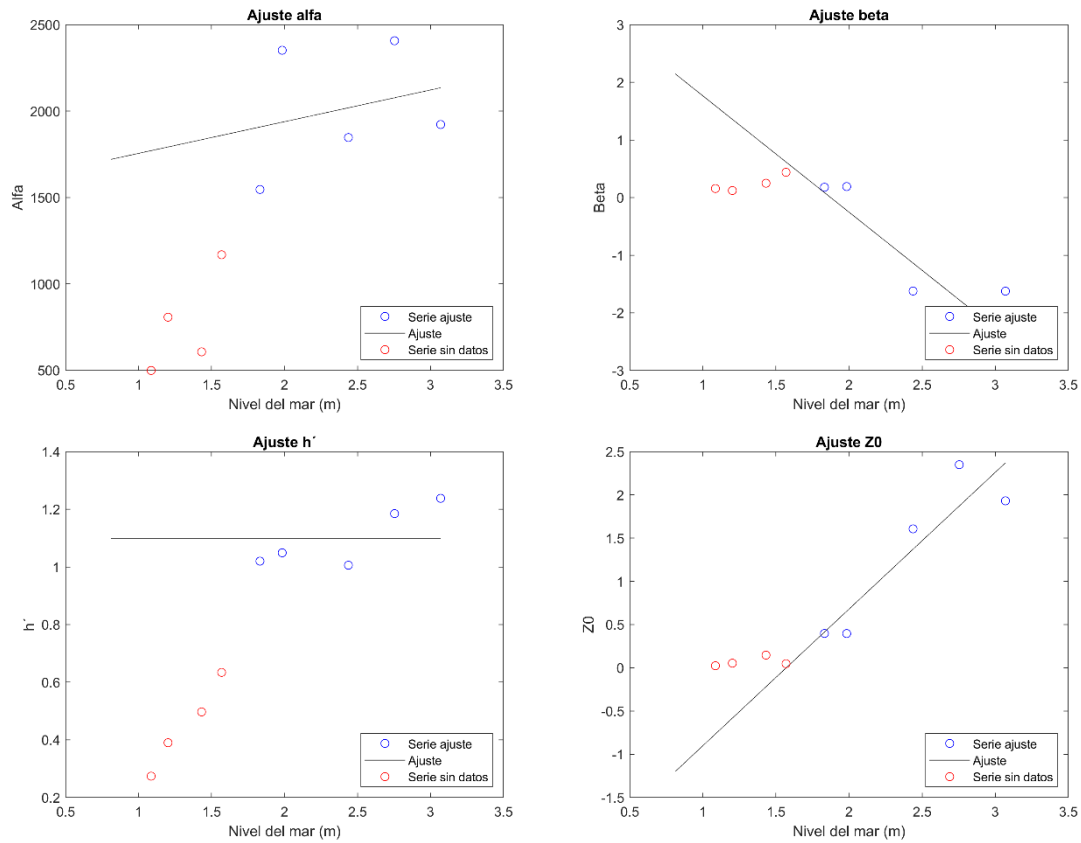


Figura AV. 7: Parámetros de calibración/estimación del 2 de enero de 2018, α , β , Z_0 y profundidad límite.

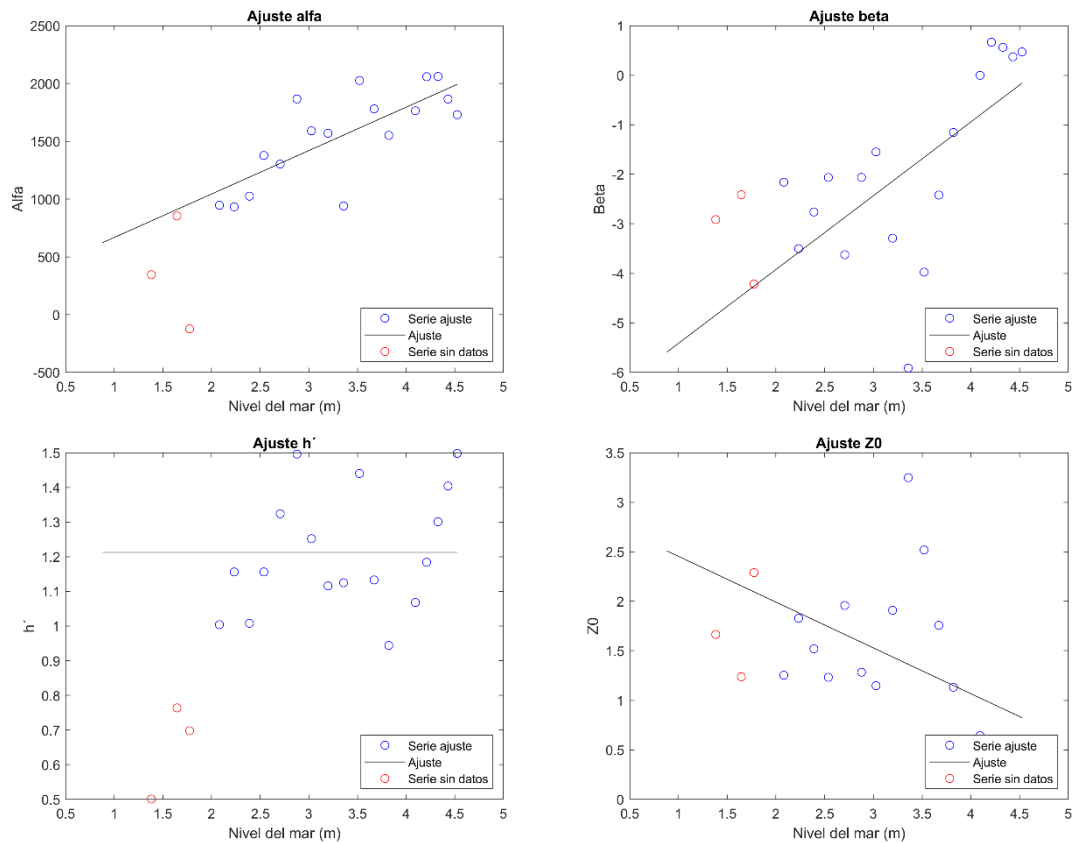


Figura AV. 8: Parámetros de calibración/estimación del 16 de mayo de 2018, α , β , Z_0 y profundidad límite.

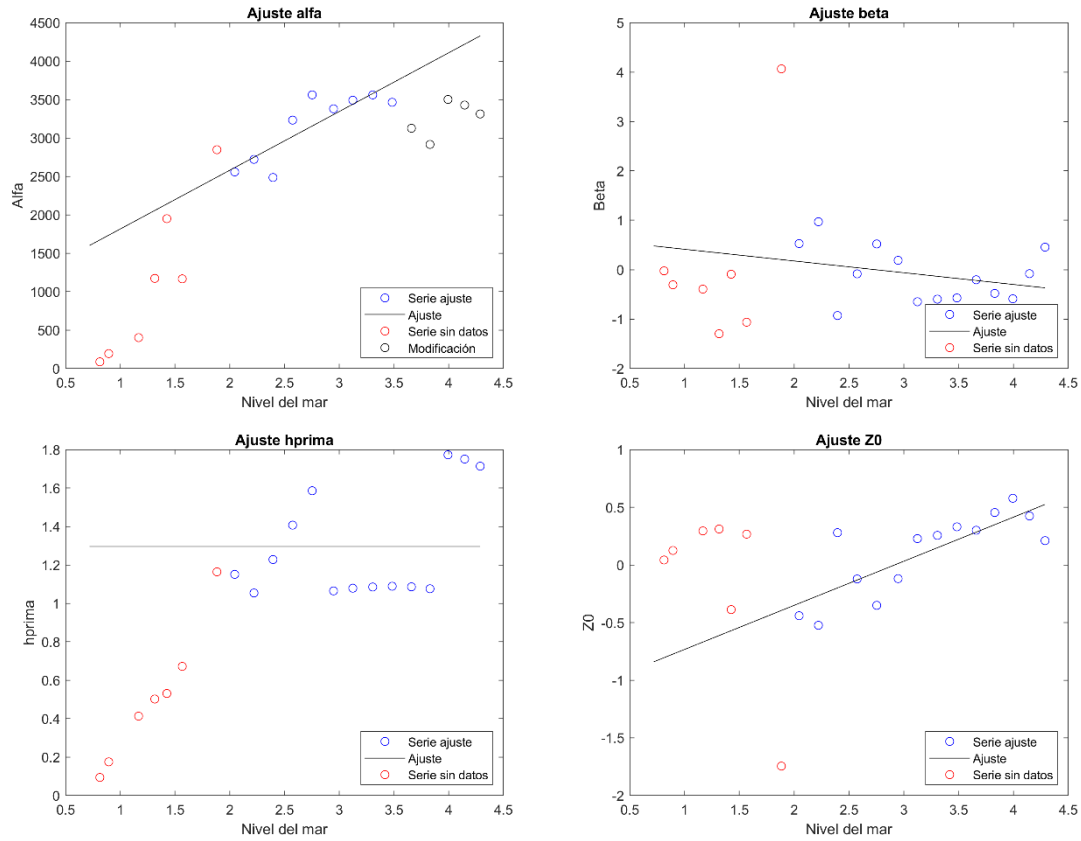


Figura AV. 9: Parámetros de calibración/estimación del 10 de septiembre de 2018, α , β , Z_0 y profundidad límite.

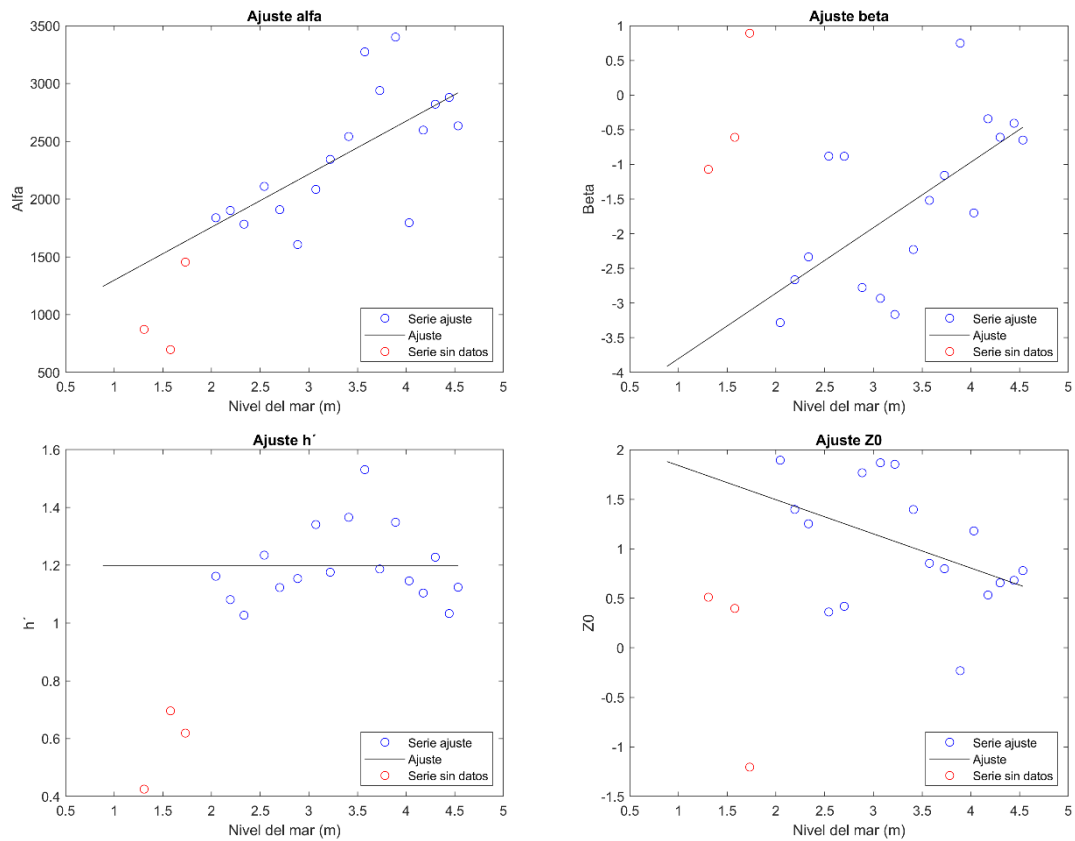


Figura AV. 10: Parámetros de calibración/estimación del 22 de enero de 2019, α , β , Z_0 y profundidad límite.

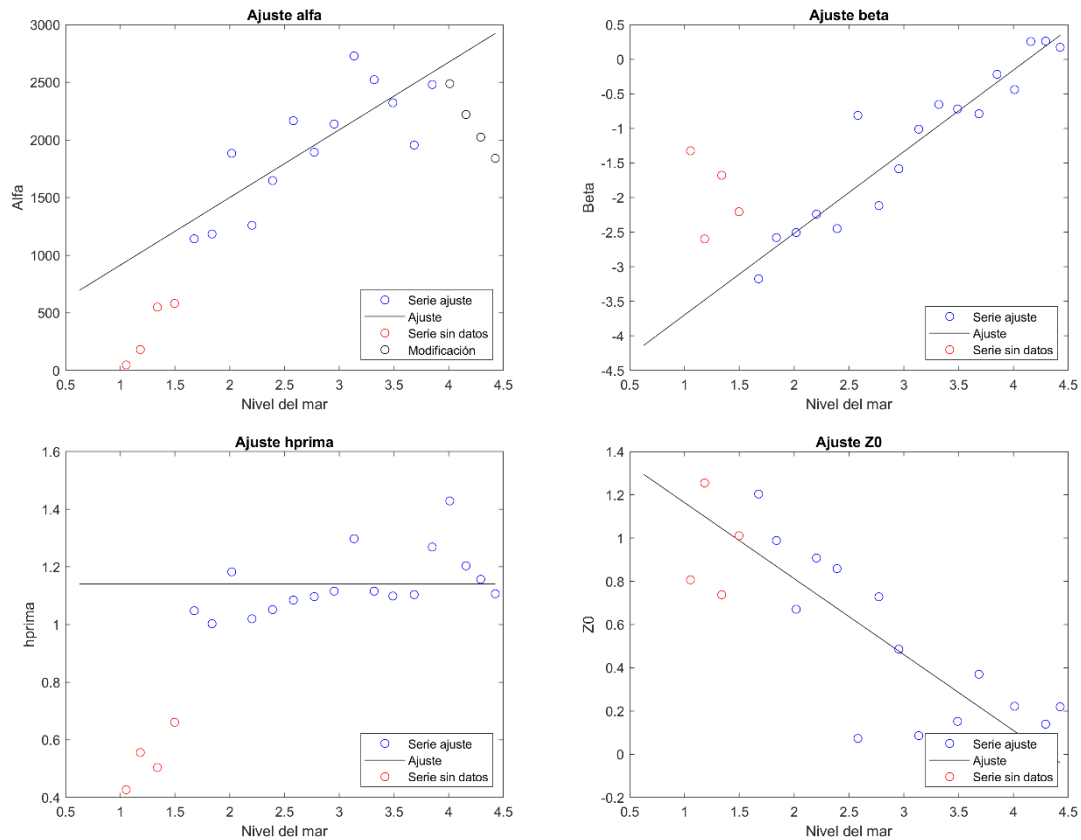


Figura AV. 11: Parámetros de calibración/estimación del 22 de marzo de 2019, α , β , Z_0 y profundidad límite.

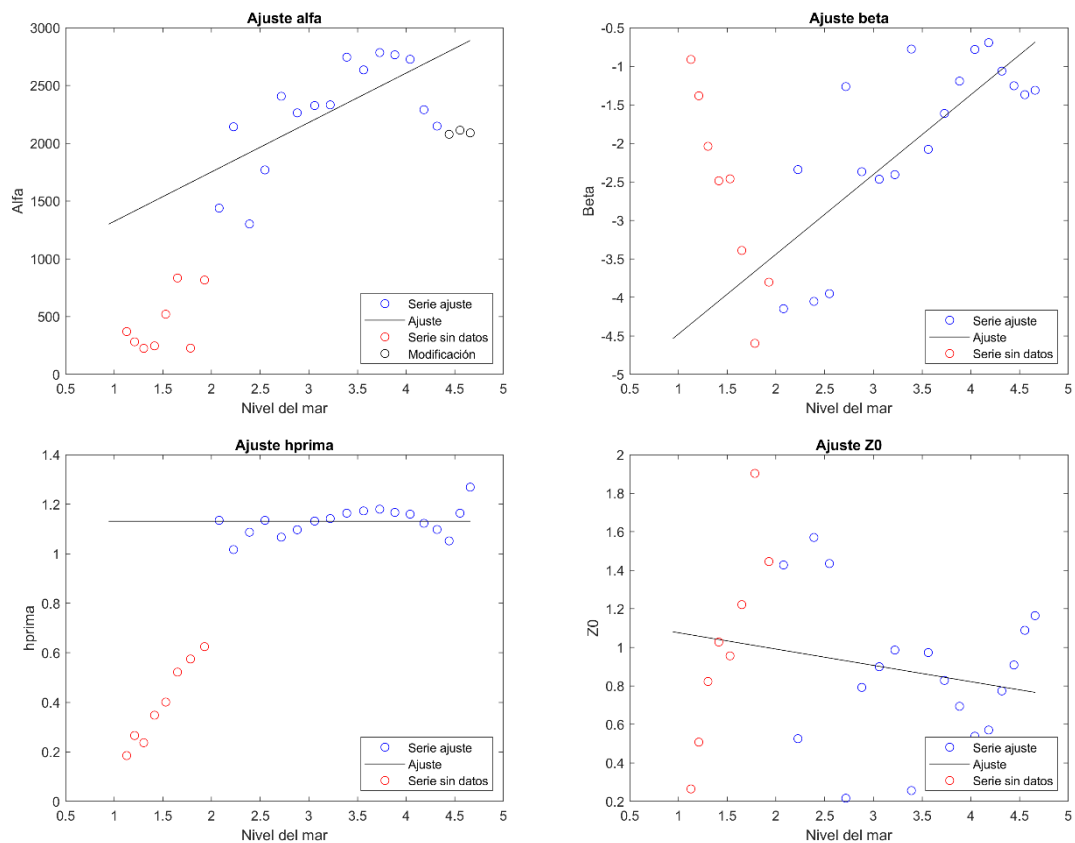


Figura AV. 12: Parámetros de calibración/estimación del 30 de agosto de 2019, α , β , Z_0 y profundidad límite.

A.VI. RECONSTRUCCIÓN DE LAS BATIMETRÍAS PARA EL ANÁLISIS A LARGO PLAZO

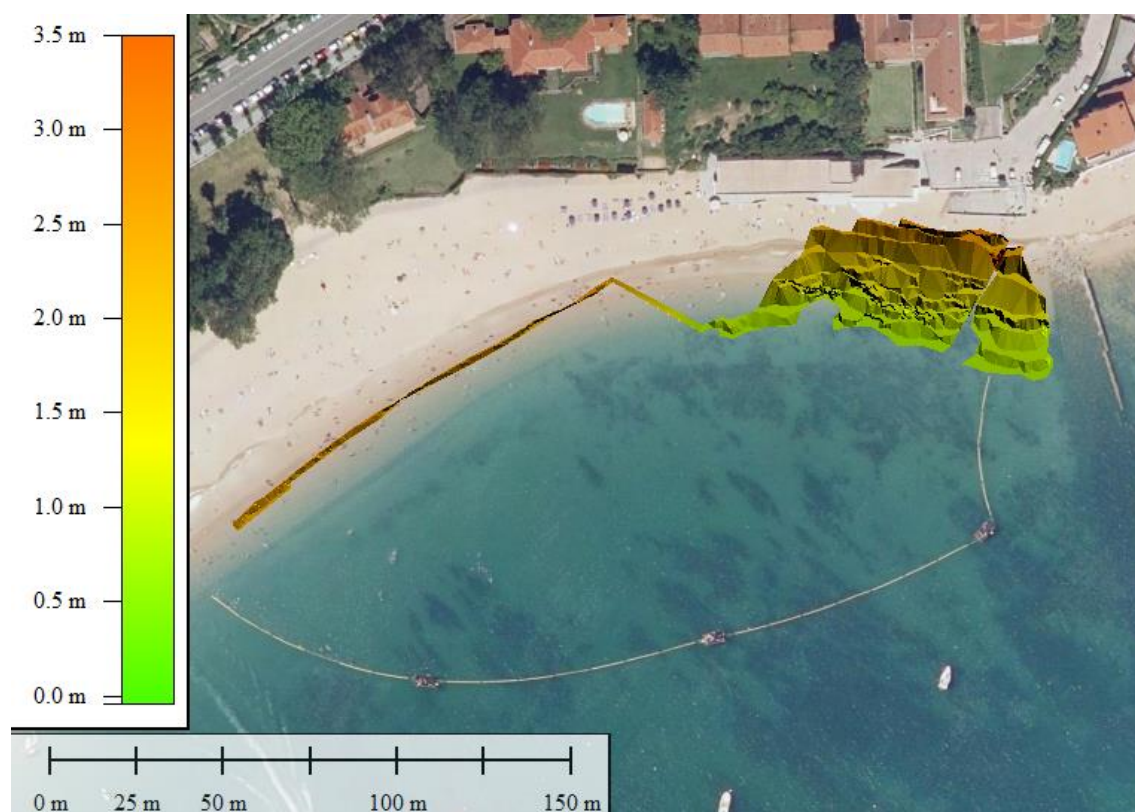


Figura A.VI. 1: Batimetría rectificada del 2 de enero de 2018.

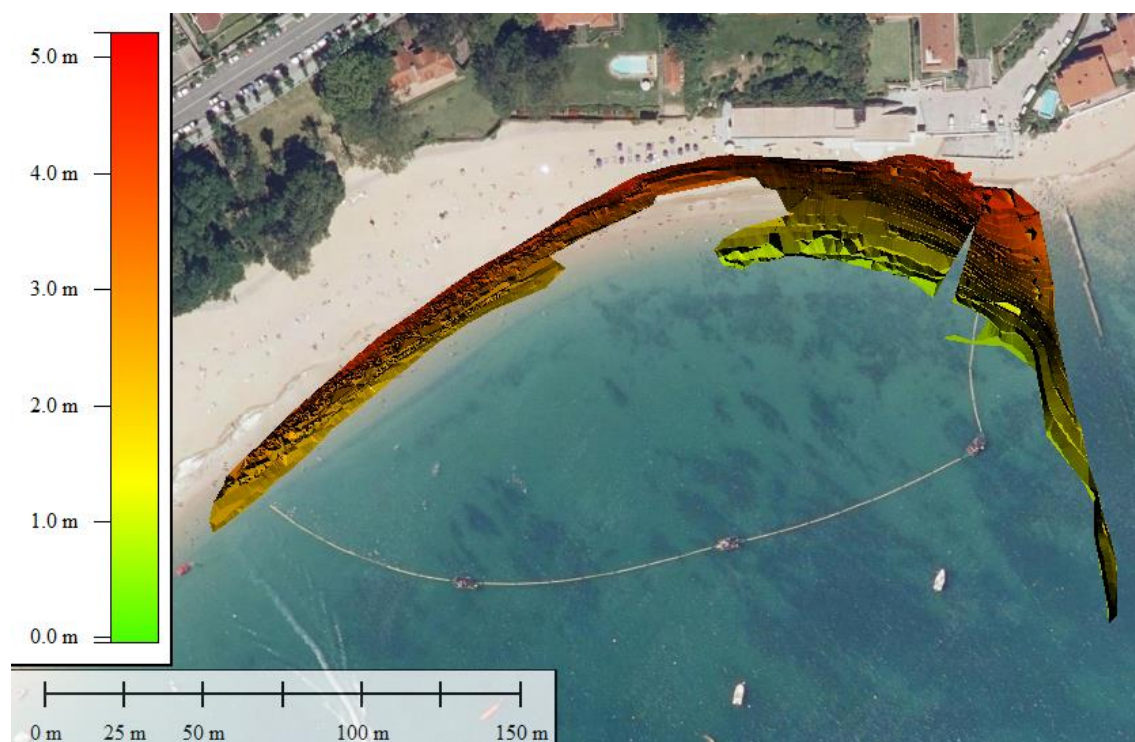


Figura A.VI. 2: Batimetría rectificada del 16 de mayo de 2018.

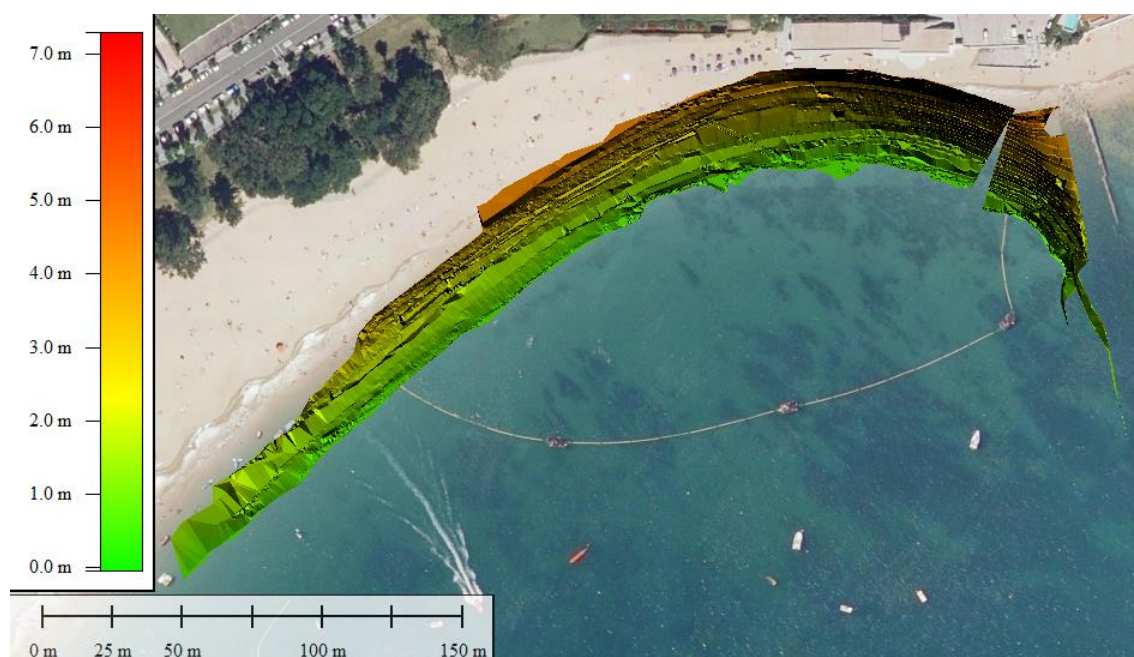


Figura A.VI. 3: Batimetría rectificada del 10 de septiembre de 2018.

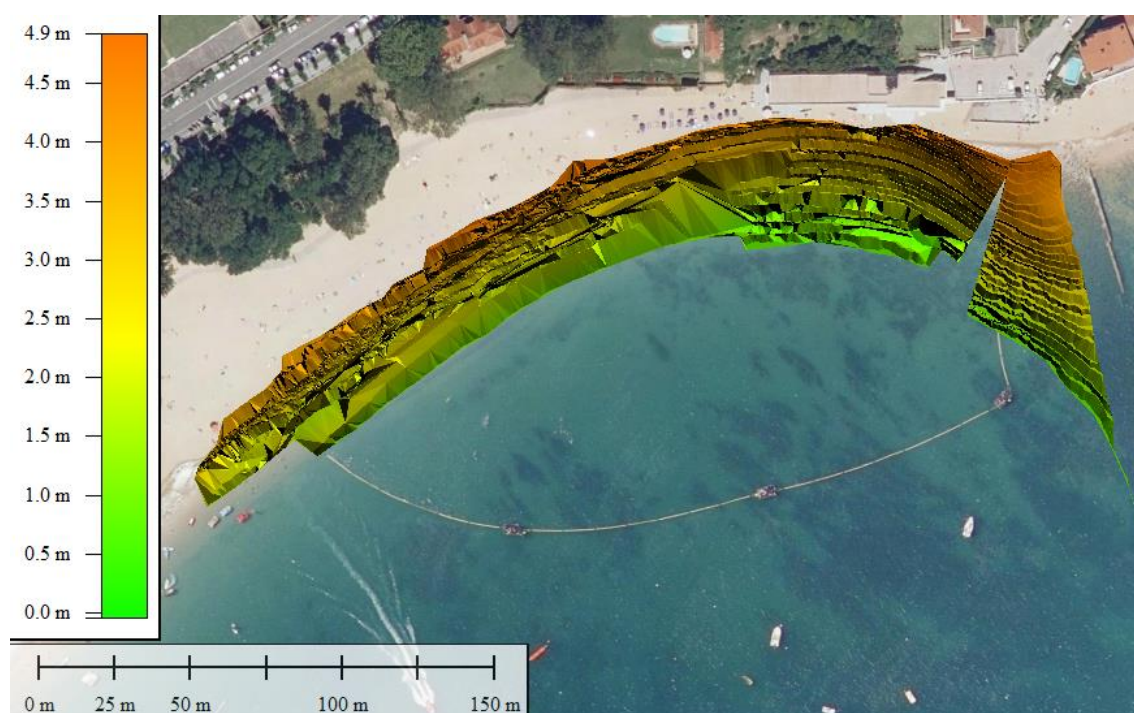


Figura A.VI. 4: Batimetría rectificada del 22 de enero de 2019.

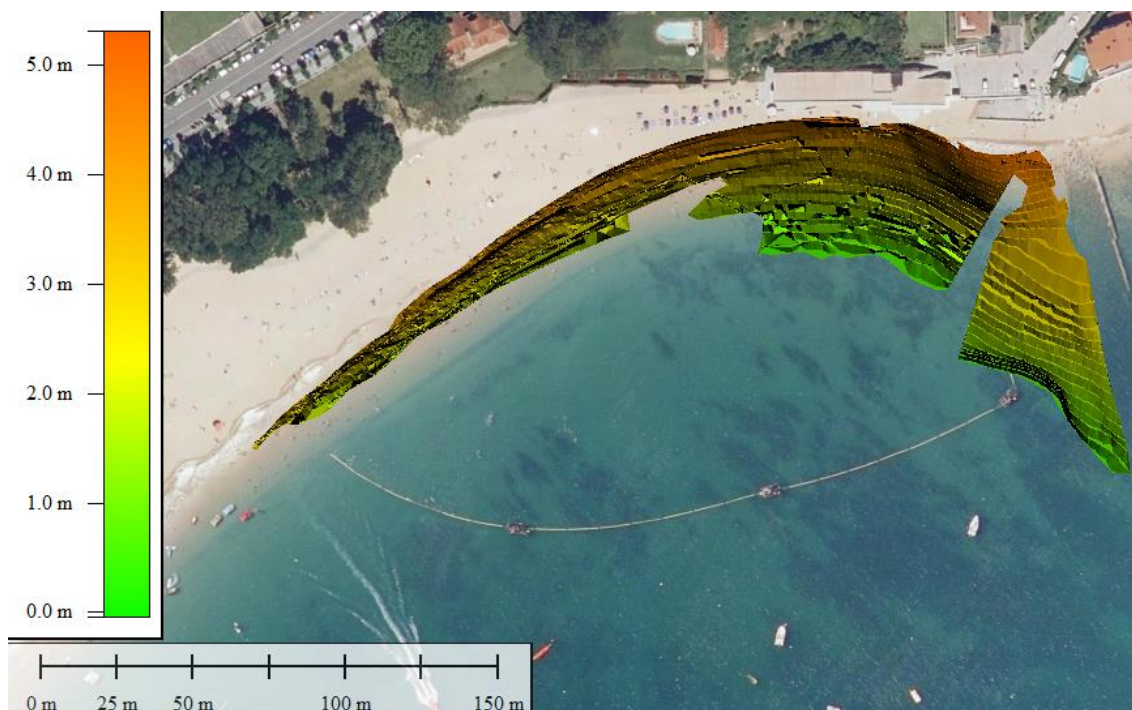


Figura A.VI. 5: Batimetría rectificada del 22 de marzo de 2019.

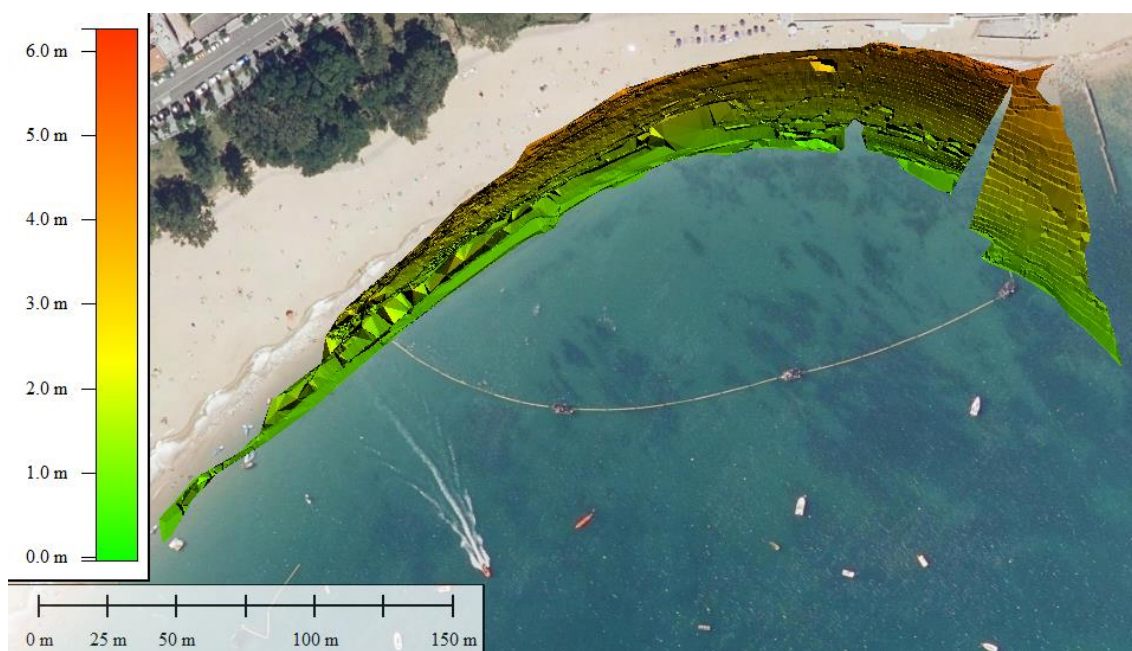


Figura A.VI. 6: Batimetría rectificada del 30 de agosto de 2019.

A.VII. IMÁGENES TIMEX DE COMPARACIÓN DE BATIMETRÍAS

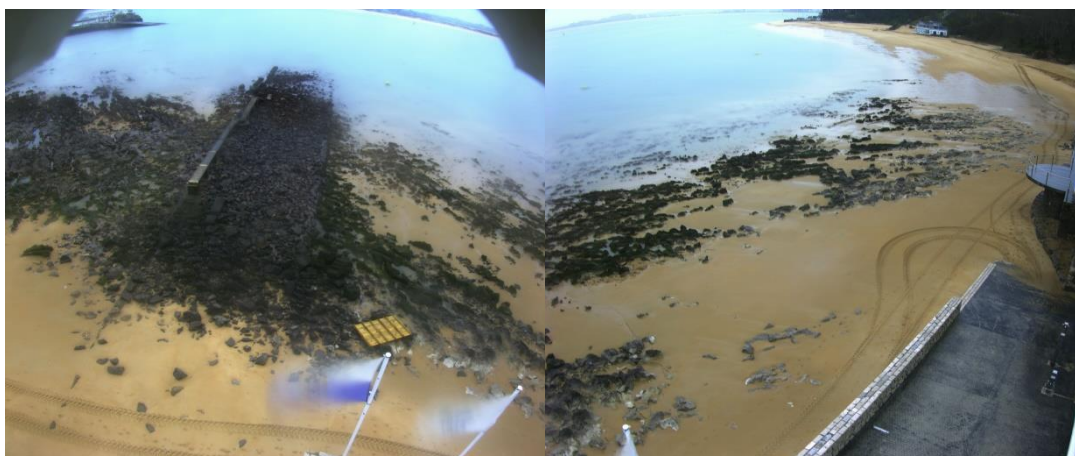


Figura A.VII. 1: Imágenes timex del 2 de enero de 2018 en el instante de bajamar, a la izquierda la cámara 2, a la derecha la cámara 1.

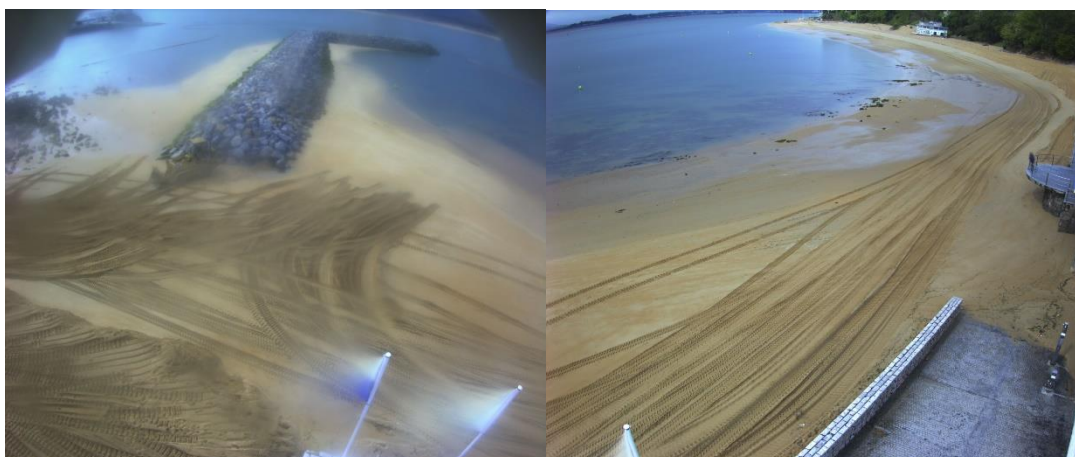


Figura A.VII. 2: Imágenes timex del 16 de mayo de 2018 en el instante de bajamar, a la izquierda la cámara 2, a la derecha la cámara 1.



Figura A.VII. 3: Imágenes timex del 10 de septiembre de 2018 en el instante de bajamar, a la izquierda la cámara 2, a la derecha la cámara 1.



Figura A.VII. 4: Imágenes timex del 22 de enero de 2019 en el instante de bajamar, a la izquierda la cámara 2, a la derecha la cámara 1.

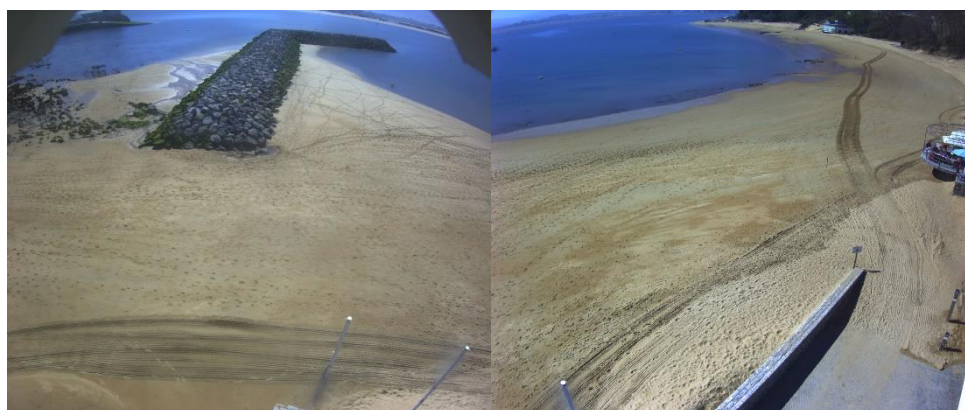


Figura A.VII. 5: Imágenes timex del 22 de marzo de 2019 en el instante de bajamar, a la izquierda la cámara 2, a la derecha la cámara 1.



Figura A.VII. 6: Imágenes timex del 30 de agosto de 2019 en el instante de bajamar, a la izquierda la cámara 2, a la derecha la cámara 1.

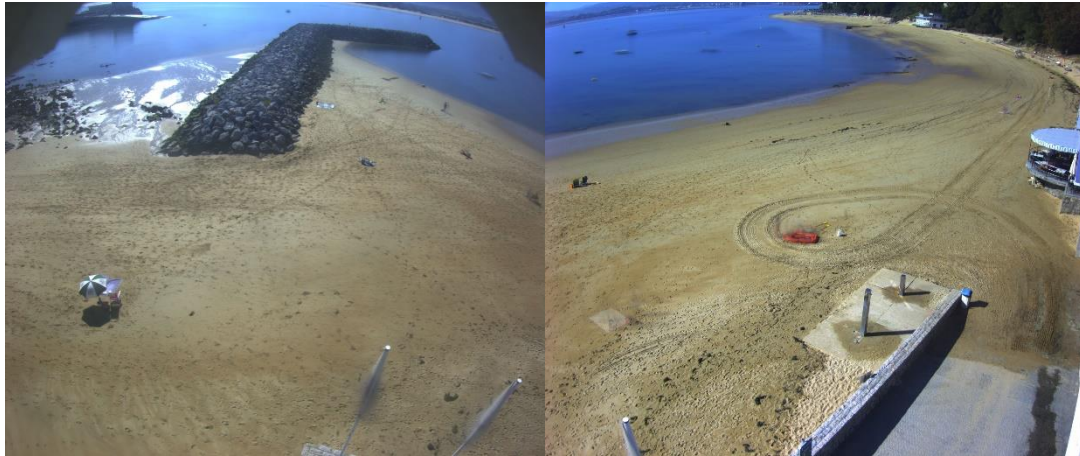


Figura A.VII. 7: Imágenes timex del 29 de septiembre de 2019 en el instante de bajamar, a la izquierda la cámara 2, a la derecha la cámara 1.